
MASTERARBEIT

Herr
Marc Nestler

**Realitätsnahe Ansteuerung der
Antriebskomponenten eines
Elektrorennfahrzeuges (FSE) auf
dem Motorenprüfstand, als
Vorstufe eines Fahrsimulators**

2015

MASTERARBEIT

Realitätsnahe Ansteuerung der Antriebskomponenten eines Elektrorennfahrzeuges (FSE) auf dem Motorenprüfstand, als Vorstufe eines Fahrsimulators

Autor:

Marc Nestler

Studiengang:

Elektrotechnik

Seminargruppe:

ET13sE-M

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Swen Schmeißer

Mittweida, Januar 2015

Bibliografische Angaben

Nestler, Marc: Realitätsnahe Ansteuerung der Antriebskomponenten eines Elektromotorenfahrzeuges (FSE) auf dem Motorenprüfstand, als Vorstufe eines Fahrsimulators, 119 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Masterarbeit, 2015

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Satz: \LaTeX

Referat

In dieser Masterarbeit wurden zwei baugleiche elektrische Antriebe über ein CAN-Bussystem als Bestandteil eines Antriebteststandes angesteuert. Dieser soll als Fahrsimulator genutzt werden. Der Antrieb selbst ist für eine spätere Verwendung im Rahmen der Formula Student Electric vorgesehen. Für den Antriebsstrang dieses Elektromotorenfahrzeuges wurde ein Sicherheitskonzept erstellt, welches neben dem Renneinsatz und dem betreffenden Regelwerk auch die Besonderheiten des Einsatzes auf dem Teststand berücksichtigt. Für die Nachbildung der Trägheit des Fahrzeuges erfolgte die Entwicklung eines Regelalgorithmus, welcher in einer erstellten Simulation des Teststandes auf Funktionsfähigkeit überprüft wurde. Die damit angesteuerte Belastungsmaschine bildet die Dynamik eines Elektromotorenfahrzeuges für den Vorwärtsbetrieb realistisch ab, sodass ein Teil der Entwicklungsschritte für das Fahrzeug am Antriebteststand erfolgen kann. Die Ansteuerung der Antriebsmaschine erfolgt über eine zentrale Steuerung, welche antriebsrelevante Komponenten des Fahrzeuges einbezieht. Grundlage der Sollmomentberechnung des Antriebes ist die Auswertung der Sensoren der Pedaleinheit, die auch die Fahrbarkeit beim regenerativen Bremsen berücksichtigt. Die Erstellung der Steueralgorithmen basiert auf dem Regelwerk. Die Realisierung dieser Algorithmen erfolgte auf einem PC mit CAN-Adapter, wurde aber für die Verwendung auf einem für ein Fahrzeug geeigneten Prototypingsteuergerät vorbereitet.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Motivation	2
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Gliederung	3
2 Grundlagen	4
2.1 Der Beschleunigungsvorgang am Rennfahrzeug	4
2.1.1 Dynamisches Moment und Trägheitsmoment	4
2.1.1.1 Modelle	5
2.1.1.2 Transformationen	5
2.1.2 Strömungswiderstand	7
2.1.3 Längsstabilität des Fahrzeuges beim Bremsvorgang	8
2.2 Regleroptimierung	11
2.2.1 Betragsoptimum	12
2.2.2 Symmetrisches Optimum	14
3 Sicherheitskonzept des Antriebsstranges	17
3.1 Gefahrenanalyse	17
3.1.1 Gefahrenanalyse am Teststand und am Rennfahrzeug	17
3.1.2 Gefahrenanalyse am Rennfahrzeug	18
3.1.3 Gefahrenanalyse am Teststand	20
3.2 Bewertung der Gefahren	21
3.2.1 Gefahrenbewertung am Teststand und am Rennfahrzeug	22
3.2.2 Gefahrenbewertung am Rennfahrzeug	22
3.2.3 Gefahrenbewertung am Teststand	22

3.3	Maßnahmen zur Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung	26
3.3.1	Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Teststand und am Rennfahrzeug	26
3.3.2	Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Rennfahrzeug	30
3.3.3	Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Teststand	34
4	Technische Ausgangssituation und nötige Erweiterungen	37
4.1	Ausgangssituation des Teststandes	37
4.2	Erweiterungen im Rahmen der Arbeit	37
4.2.1	Elektrischer Aufbau des Teststandes	37
4.2.2	Auswahl der VCU	40
4.2.3	Pedaleinheit	42
5	Definition und Implementierung der Algorithmen	43
5.1	Softwarekonzept Teststand	43
5.2	Vorbereitende Arbeiten	44
5.2.1	Berechnung der Trägheitsmomente	44
5.2.1.1	Nachbildung der Fahrzeugträgheit	44
5.2.1.2	Nachbildung der Trägheit des Testaufbaus	47
5.2.2	Fehlererkennung am Teststand	48
5.2.2.1	Checksummen- und Messagecounteralgorithmus zur Ansteuerung des Inverters in CANOE	48
5.2.2.2	Checksummen- und Messagecounteralgorithmus zur Ansteuerung des Inverters in SIMULINK	49
5.2.3	Bedienung des Teststandes	51
5.3	Trägheitssimulation durch die Belastungsmaschine	51
5.3.1	Anforderungen	51
5.3.2	Konzept und Struktur	52
5.3.2.1	Schnittstellen des Algorithmus und ihre Verwendung	52
5.3.2.2	Struktur der Regelung	52
5.3.2.3	Bestimmung der Übertragungsfunktionen	54
5.3.2.4	Bestimmung des Reglers	57
5.3.2.5	Führungs-, Störverhalten und Stabilität	59
5.3.3	Implementierung der Trägheitssimulation auf dem PC	60

5.3.4	Erstellen des Simulationsmodells	61
5.4	Fahrzeugantrieb durch die Antriebsmaschine	64
5.4.1	Anforderungen	64
5.4.1.1	Allgemeine Anforderungen	64
5.4.1.2	Relevante Vorschriften des Regelwerkes	67
5.4.2	Konzept und Struktur	68
5.4.2.1	Schnittstellen des Algorithmus und ihre Verwendung	68
5.4.2.2	Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug	69
5.4.2.3	Algorithmus Berechnung Stellung und Plausibilität <i>Encoder</i>	75
5.4.2.4	Algorithmus Drehmomentbereitstellung	76
5.4.2.5	Algorithmus Leistungsbegrenzung	77
5.4.2.6	Algorithmus Begrenzung Rekuperation	78
5.4.2.7	Priorisierung der Tasks	81
5.4.3	Implementierung der Steuergerätesoftware auf der VCU bzw. dem PC	81
5.4.3.1	Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug	82
5.4.3.2	Algorithmus Berechnung Stellung und Plausibilität <i>Encoder</i>	85
5.4.3.3	Algorithmus Begrenzung Rekuperation und Drehmomentbereitstellung	86
5.4.3.4	Algorithmus Leistungsbegrenzung	87
6	Test und Verifizierung der Algorithmen	88
6.1	Belastungsmaschine	88
6.1.1	Tests am Simulationsmodell	88
6.1.2	Tests am Teststand	89
6.2	Antriebsmaschine	93
6.2.1	Test der Berechnung der Stellung und Plausibilität der <i>Encoder</i>	94
6.2.2	Test der Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug	96
6.2.3	Test der Drehmomentbereitstellung und Begrenzung der Rekuperation	98
6.2.4	Test der Begrenzung der Leistung	99
6.2.5	Test der Ansteuerung des Antriebes, DCDC-Wandlers und des AMS	101
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	105
7.1	Zusammenfassung und Fazit	105
7.2	Ausblick	106

A	Simulinkmodell Trägheitssimulation.....	107
B	Simulinkmodell VCU - Zustandsmaschine	108
B.1	Fahrmodus	108
B.1.1	Stop	108
B.1.2	Bereitschaft	109
B.1.3	Fahrzeug_Betrieb.....	109
B.1.4	Wahrheitstabellen.....	110
B.2	Fehlerzustand	111
B.2.1	Fehlerzustand_Antrieb	111
B.2.2	Wahrheitstabellen.....	112
B.3	DCDC-Wandler	113
B.3.1	DCDC-Wandler	113
B.3.2	Wahrheitstabelle	113
C	Priorisierung CAN-Nachrichten und ihrer Tasks	114
D	Simulation - Trägheit mit Lastfunktion - Regelung unter Nutzung des Sollmomentes der AM	116
	Literaturverzeichnis	117

II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Bremskraftverteilung am Kraftfahrzeug [9, Seite 202]	9
2.2	Feste und abgeknickte Bremskraftverteilung [9, Seite 218]	10
2.3	Zusammenhang Pedalweg-Abbremsung [15, Seite 110]	11
2.4	Regelkreis	11
2.5	Sprungantwort Führungsübertragungsfunktion - Betragsoptimum	12
2.6	Amplituden-/Phasengang Führungsübertragungsfunktion - Betragsoptimum	13
2.7	Sprungantwort Führungs-/Störübertragungsfunktion - Symmetrisches Optimum [14, Seite 66]	15
2.8	Amplituden-/Phasengang Offener Kreis - Symmetrisches Optimum $a = 2$	16
2.9	Amplituden-/Phasengang Führungsübertragungsfunktion - Symmetrisches Optimum $a = 2$	16
3.1	Empfohlene Verdrahtung der Schutzeinrichtungen im Fahrzeug - <i>shutdown circuit</i> [13, 118]	28
4.1	Verdrahtung GLVS Teststand	39
4.2	Kommunikation Komponenten Teststand	40
5.1	Softwarekonzept am Teststand	45
5.2	Übersicht Anordnung Rennfahrzeug	45
5.3	Übersicht Anordnung Teststand	47
5.4	Beispiellayout einer CAN-Nachricht	50
5.5	Checksummenberechnung in SIMULINK am Beispiel einer CAN-Nachricht an den Antrieb	50
5.6	Regelkreis Teststand	53
5.7	Modifizierter Regelkreis Teststand	54
5.8	Sprungantwort Sollmoment-Istmoment Antrieb	55
5.9	Übergangsfunktion Approximation Sollmoment-Istmoment	56
5.10	Amplituden- und Phasengang offener Kreis	59
5.11	Nyquistdiagramm	60
5.12	Modell Trägheitsregelung Belastungsmaschine	62

5.13	Modell Trägheitsregelung Belastungsmaschine - Verbindung Hardware	62
5.14	Simulation - Struktur Trägheitsregelung Belastungsmaschine	63
5.15	Simulation - SIMULINK Referenzmodell	64
5.16	Antriebsrelevante Komponenten im Fahrzeug	65
5.17	Aktivierungsvorschrift Antrieb - AMS [nach 12, Seite 25].....	66
5.18	UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Übergeordnete Ebene	70
5.19	UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Stop	71
5.20	UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Bereitschaft	71
5.21	UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Fahrzeug_Betrieb	72
5.22	UML-Zustandsdiagramm VCU - Fehlerzustand_Antrieb	73
5.23	UML-Zustandsdiagramm VCU - DCDC	74
5.24	Wertebereich Potentiometer	75
5.25	Bremskraftverteilung am Rennfahrzeug ideal-real	80
5.26	Modell - VCU - oberste Ebene	83
5.27	Modell - Shutdown Antrieb	84
5.28	Modell - Berechnung Stellung und Plausibilität <i>Encoder</i>	86
5.29	Modell - Begrenzung Rekuperation	86
5.30	Modell - Leistungsbegrenzung	87
6.1	Test - Simulation - Sollmoment	88
6.2	Test - Simulation - Kreisfrequenz Regelung ohne Last	90
6.3	Test - Simulation - Drehmoment Regelung ohne Last	90
6.4	Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Sollwertberechnung Istwert Antriebs- maschine.....	92
6.5	Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Sollwertberechnung Sollwert An- triebsmaschine	93
6.6	Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Schwingereignis nach Aktivierung...	94
6.7	Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Schwingereignis nach Nullmoment..	95
6.8	Bedienpanel - Test Zustandsmaschine	96
6.9	Test - Priorisierung Pedal, Abschaltmechanismus	99
6.10	Test - Geschwindigkeitsgrenze Rekuperation	100
6.11	Test - Verhältnis Bremskraft-Abbremsung	100

6.12 Test - Vorgabe Sollmoment Antrieb	101
6.13 Test - Leistungsbegrenzung - oberes Grenzmoment	102
6.14 Test - Leistungsbegrenzung - Maximalleistung	102
6.15 Anfahr- und Abfahrsszenario	103
6.16 Fahrbereitschaft Antrieb	104

III. Tabellenverzeichnis

2.1 Modelle zur Berechnung des Trägheitsmomentes bezüglich ihrer Längsachse [4, Seite 65]	5
3.1 Bewertungssystem der FMEA in der FSE [3, Tab 3]	22
3.2 Bewertung der Gefahren - allgemein	23
3.3 Bewertung der Gefahren - Rennfahrzeug	24
3.4 Bewertung der Gefahren - Teststand	25
5.1 Relevante Fahrzeugdaten	46
5.2 Ersatzträgheitsmomente des Fahrzeuges	46
5.3 Relevante Daten Teststand	47
5.4 Ersatzträgheitsmomente des Teststandes	47
5.5 Kennwerte für Algorithmus Rekuperation	79

IV. Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Converter
AIR	Accumulator Isolation Relays
AMS	Accumulator Management System
BSPD	Brake System Plausibility Device
CAN	Controller Area Network
CAPL	CAN Access Programming Language
DCDC-Wandler ...	Gleichspannungswandler
Det	Detection - Entdeckungswahrscheinlichkeit
EBV	Elektronische Bremskraftverteilung
ESA	Electrical System Advisor
ESF	Electrical System Form
ESO	Electrical System Officer
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSE	Formula Student Electric
GLVMS	Grounded Low Voltage Master Switch
GLVS	Grounded Low Voltage System
HVD	High Voltage Disconnect
HVIL	High Voltage Interlock Line
IMD	Isolation Monitoring Device
KL15	Klemme 15 - Geschaltetes Plus
KL50	Klemme 50 - Start Antrieb
LIN	Local Interconnect Network
Occ	Occurrence - Auftretswahrscheinlichkeit
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
Sev	Severity - Schadensausmaß
SOC	State Of Charge
TKU	Technische Kundenunterlage
TS	Tractive System
TSAL	Tractive-System-Active Light
TSMS	Tractive-System-Master Switch
VCU	Vehicle Control Unit

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Fakultät, Elektro- und Informationstechnik
Professur Antriebs- und Regelungstechnik
Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß



Aufgabenstellung Masterarbeit für Marc Nestler

Thema: Realitätsnahe Ansteuerung der Antriebskomponenten eines Elektrorennfahrzeuges (FSE) auf dem Motorenprüfstand, als Vorstufe eines Fahrsimulators

Mittweida, 01.04.2014

Als erster Entwicklungsschritt vor dem Aufbau eines Elektrorennfahrzeuges, muss die Inbetriebnahme und Bewertung aller Komponenten auf dem Prüfstand erfolgen. Diese Arbeit befasst sich mit der CAN-Ansteuerung des Antriebsmotors über dessen Inverter. Dabei muss die Stellung von Fahr- und Bremspedal in CAN-Botschaften gewandelt werden, um sie als Sollwerte im Inverter verarbeiten zu können. Um realitätsnahe Aussagen zur Dynamik des Elektrorennfahrzeuges generieren zu können, ist ein baugleicher Antriebsmotor so zu regeln, dass er die Trägheit des Fahrzeuges abbildet. So kann mit dem Prüfstand ein Rennen nachempfunden und Optimierungspotential für die Ansteuerung abgeleitet werden.

Arbeitspakete:

1. Abbildung der Fahrzeugträgheit mit dem Belastungsmotor
 - Ermittlung der translatorischen und rotatorischen Trägheit des Elektrorennfahrzeuges durch Berechnungen und Messungen
 - Simulation der Algorithmen zu Nachbildung der Fahrzeugträgheit in PORTUNUS
 - Implementierung der Algorithmen im Laptop mit CAN-Adapter zur Ansteuerung des Belastungsmotors
2. Auswertung der Fahr- und Bremspedalstellung
 - Erfassung der Fahr- und Bremspedalstellung und Wandlung in CAN-Botschaften
 - Priorisierung der Pedale im Algorithmus
 - Nutzung des maximalen Rekuperationspotentials beim Bremsen unter Berücksichtigung der Fahrbarkeit
3. Sicherheitskonzept am Prüfstand und im Rennfahrzeug (FSE)
 - die Sicherheitsbedingungen im Laborbetrieb sind nach aktuellen DIN-Normen umzusetzen, so dass ein gefahrenfreier Betrieb möglich ist
 - die Regeln der SAE für die Rennfahrzeuge der Formula Student Elektro (FSE) sind schon beim Prüfstandsbetrieb einzuhalten, um Probleme beim Übergang ins Fahrzeug zu vermeiden
4. Implementierung und Test der Steueralgorithmen des Antriebsmotors im Laptop mit CANoe
 - Berücksichtigung des maximalen elektrischen Leistungsbezuges von 85kW aus der Gleichspannungsquelle
 - Implementierung der Steueralgorithmen und Test auf dem Motorenprüfstand
 - Anforderungsbeschreibung für ein Steuergerät zur Umsetzung der entwickelten Algorithmen

Hochschulbetreuer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

1.2 Motivation

Die Einhaltung immer schärferer Abgasnormen, aber vor allem die Verringerung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs konventioneller Fahrzeuge in der Europäischen Union ab 2020 durch die Vorgabe eines maximalen CO_2 -Ausstoßes der Fahrzeugflotte, stellt die Hersteller von Kraftfahrzeugen vor schwierige Aufgaben. Eine Lösung dieses Problems ist der Einsatz von elektrischen Antrieben in Kraftfahrzeugen, sei es als reiner Elektroantrieb oder als Hybridantrieb in Verbindung mit konventioneller Antriebstechnik. Das Team Technikum Mittweida Motorsport der Hochschule Mittweida nimmt seit mehreren Jahren am Wettbewerb der Formula Student mit einem Fahrzeug mit Ottomotor teil. Im Hintergrund der fortschreitenden Verbreitung des Elektroantriebes in Fahrzeugen hat sich das Team entschieden, im Jahr 2015 ein Elektrorennfahrzeug im Rahmen der Formula Student Electric (FSE) einzusetzen. Die FSE ist ein Designwettbewerb, indem Studenten einen kompletten Rennwagen entwickeln und sich untereinander in verschiedenen technischen und wirtschaftlichen Disziplinen messen. Die Entwicklung eines solchen Fahrzeuges ist aufwendig und nicht zu unterschätzen. Dabei spielt die Integration des elektrischen Antriebs zeitlich und personell eine große Rolle. Die Entwicklungszeit kann durch verschiedene Maßnahmen, wie der modellbasierten Entwicklung, verkürzt werden. Zur Erprobung von einzelnen Komponenten und des Antriebs selbst ist ein Teststand erforderlich. Mit diesem ist neben dem frühzeitigen Erkennen und Beheben von Fehlern auch eine spätere Optimierung des Fahrzeuges möglich. Zusätzlich kann der Teststand als Fahrsimulator genutzt werden, wodurch auch der Aspekt Marketing für das Team und die Hochschule abgedeckt wird.

1.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ansteuerung eines elektrischen Antriebes über seine CAN-Schnittstelle, der in dem zukünftigen Elektrorennfahrzeug der FSE der Hochschule Mittweida eingesetzt werden soll. Zu Beginn muss das Sicherheitskonzept des elektrischen Antriebsstranges ausgearbeitet werden, welches die Regeln des Wettbewerbes der FSE berücksichtigt. Für den Einsatz als Antriebseinheit des Rennwagens ist die Entwicklung und Implementierung von Algorithmen der Steuerung und Drehmomentberechnung im Hinblick auf die Fahrzeugsteuerung notwendig, wobei das Regelwerk der FSE die Grundlage darstellt. Diese sollen an einem Antriebteststand auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden. Dabei sind die zur Ansteuerung des Antriebes relevanten Komponenten im Fahrzeug, wie die Pedaleinheit, zu berücksichtigen und einzubeziehen. Um die Algorithmen der Fahrzeugsteuerung verifizieren zu können, ist eine Nachbildung der Trägheit des Fahrzeuges am Teststand durch einen baugleichen Antrieb erforderlich. Zur Momentberechnung ist die Entwicklung eines Regelalgorithmus notwendig, der in einer Simulation erprobt werden soll. Anschließend soll dieser Algorithmus die Belastungsmaschine steuern und die Trägheit des Rennfahrzeuges nachbilden.

1.4 Gliederung

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Darstellung zum Verständnis der Arbeit notwendiger Grundlagen. Diese unterteilen sich in die Behandlung des Beschleunigungsvorgangs am Rennfahrzeug und der verwendeten Regleroptimierung der Belastungsmaschine des Teststandes. In Kapitel 3 erfolgt eine systematische Analyse und Bewertung der Gefahren des Antriebsstrangs in Form eines Sicherheitskonzeptes. Empfehlungen zu ihrer Vermeidung- bzw. Reduzierung werden aufgezeigt. Neben der Verwendung im Rennfahrzeug wird auf die Besonderheiten am Teststand eingegangen. Der für die Tests vorgesehene Antriebteststand musste für die Arbeit angepasst werden. Die Ausgangssituation und die durchgeführten Erweiterungen, wie auch die Auswahl der Fahrzeugsteuerung werden in Kapitel 4 besprochen. In Kapitel 5 werden die Algorithmen der Antriebs- und Belastungsmaschine mitsamt nötiger Vorarbeiten, wie der Berechnung des Trägheitsmomentes von Fahrzeug und Testaufbau, beschrieben. Diese werden in das jeweilige Konzept und ihre anschließende Implementierung unterteilt. Auf die zum Test der Regelung der Belastungsmaschine erstellte Simulation wird gesondert eingegangen. Die Erprobung der Algorithmen zur Ansteuerung der Belastungsmaschine in der Simulation und beider Maschinen am Antriebteststand erfolgt in Kapitel 6. Die Arbeit schließt mit ihrer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Der Beschleunigungsvorgang am Rennfahrzeug

Für die Analyse des Beschleunigungsvorganges wird das Drehmomentengleichgewicht betrachtet. Es ergibt sich allgemein zu

$$\vec{0} = \sum_{v \in \mathbb{N}} \vec{M}_v \quad (2.1)$$

. Nachfolgend gehen Drehmomentquellen positiv und Drehmomentsenken negativ in die Betrachtung ein, womit durch den Angriffspunkt der Momente auf eine Drehachse die vektorielle Darstellung entfallen kann. Neben dem Antriebsmoment M_{PSM} als Drehmomentquelle müssen die Fahrwiderstände¹ einbezogen werden. Im Einzelnen sind dies der Rollwiderstand F_R , der Luftwiderstand F_{Luft} , der Steigungswiderstand F_{St} und der Beschleunigungswiderstand F_{dyn} [nach 9, Seite 69]. In dieser Darstellung wird ihre äquivalente Darstellung als Drehmoment, bezogen auf die Antriebsseite, genutzt. Somit ergibt sich

$$M_{PSM} = M'_R + M'_{Luft} + M'_{St} + M'_{dyn} \quad (2.2)$$

. Da der verwendete momentgeregelte Antrieb sein inneres Reibmoment bereits berücksichtigt, entfällt dieser Teil. Der unbekannte Teil der Reibung im Antriebsstrang des Fahrzeuges wird vernachlässigt. Der Rollwiderstand am Rennfahrzeug ist für die Aufgabe nicht relevant und wird daher ebenfalls vernachlässigt, genauso wie die Gleitreibung bei Reifenschlupf. Diese ist am Teststand nicht mit einfachen Mitteln nachzustellen. Eine Nachbildung des Steigungswiderstandes ist nicht Teil der Aufgabe, kann bei Bedarf aber hinzugefügt werden. Der Luftwiderstand sollte beachtet werden. Da er geschwindigkeitsabhängig ist, eignet er sich gut dazu, eine Verharrungsdrehzahl am Teststand zu erreichen. Das Drehmomentengleichgewicht mit den für die Arbeit relevanten Anteilen lautet somit:

$$M_{PSM} = M'_{Luft} + M'_{dyn} \quad (2.3)$$

2.1.1 Dynamisches Moment und Trägheitsmoment

Um das Beschleunigungsverhalten des Rennfahrzeuges am Teststand exakt nachbilden zu können, muss das zur Beschleunigung notwendige dynamische Moment bekannt

¹ Diese sogenannten Fahrwiderstände stellen Kräfte dar.

Körper	Trägheitsmoment
Vollzylinder	$J = \frac{m \cdot r^2}{2}$
Zylindermantel	$J = m \cdot r^2$

Tabelle 2.1: Modelle zur Berechnung des Trägheitsmomentes bezüglich ihrer Längsachse [4, Seite 65]

sein. Grundsätzlich ist das dynamische Moment auf der Antriebsseite nach

$$M'_{dyn} = J' \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

vom auf die Antriebsseite bezogenen Trägheitsmoment J' und von der gewünschten Winkelbeschleunigung $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ abhängig. Für die Bestimmung der Trägheitsmomente werden in den nächsten Abschnitten geeignete Modelle und Transformationen vorgestellt.

2.1.1.1 Modelle

Das Trägheitsmoment J komplexer Körper ist nicht trivial zu berechnen. Soll das Trägheitsmoment des Körpers nicht gemessen werden, kann die Anordnung oft auf einfache Modelle zurückgeführt werden. Die in der Arbeit benötigten Modelle sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Dabei ist m die Masse des Körpers und r der äußere Radius des Körpers ².

2.1.1.2 Transformationen

Durch das im Fahrzeug verwendete Getriebe und die translatorische Bewegung des Fahrzeuges müssen die berechneten Momente jeweils auf die Drehzahl der Antriebsseite umgerechnet werden. Dies geschieht durch entsprechende Transformationen. Als Erstes ist hier die Transformation Rotation-Rotation zu nennen, was einer Umrechnung zwischen verschiedenen Drehzahlen entspricht. Die Berechnung erfolgt über folgenden Ansatz ³

$$P_{dyn1} \cdot \eta_G = P'_{dyn2} \cdot \eta_G = P_{dyn2}$$

, wobei P_{dyn1} die dynamische Wirkleistung der Antriebsseite, P_{dyn2} die dynamische Wirkleistung der Abtriebsseite, P'_{dyn2} die auf die Antriebsseite umgerechnete dynamische Wirkleistung der Abtriebsseite und η_G den Getriebewirkungsgrad darstellt. Durch Aus-

² Im Fall des Reifens würde dies beispielsweise dem statischen Reifenhalbmesser entsprechen.

³ Der Energiefluss ist vom Antrieb in Richtung Räder gerichtet. Im umgekehrten Fall der Rekuperation geht der Wirkungsgrad des Getriebes als reziproker Wert ein und vermindert die durch die Trägheit an den Akkumulator abgegebene Energie.

nutzen der Beziehung

$$P_{dyn} = M_{dyn} \cdot \omega \quad (2.5)$$

und der Gleichung 2.4 auf der vorherigen Seite ergibt sich der Zusammenhang:

$$J_2' \cdot \frac{d\omega_2'}{dt} \cdot \omega_2' = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \cdot \frac{\omega_2}{\eta_G}$$

. Durch die Definition des Übersetzungsverhältnisses von der Antriebs- zur Abtriebsseite [1, Seite 559] und der Beziehung $\omega_1 = \omega_2'$ ergibt sich

$$i_G = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_2'}{\omega_2} \quad (2.6)$$

, womit sich eine Vereinfachung erzielen lässt. Dadurch kann die Gleichung zu

$$\begin{aligned} J_2' \cdot i_G \cdot \frac{d\omega_2}{dt} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \cdot \frac{1}{i_G \cdot \eta_G} \\ J_2' &= J_2 \cdot \frac{1}{i_G^2 \cdot \eta_G} \end{aligned}$$

umgewandelt werden. Das Ersatzträgheitsmoment ergibt sich damit allgemein zu

$$J_{rot-rot}' = J \cdot \frac{1}{i_G^2 \cdot \eta_G} \quad (2.7)$$

. Weiterhin wird eine Transformation benötigt, die eine translatorische in eine rotatorische Bewegung umwandelt. Auch hierzu kann wieder der Ansatz über die Leistung genutzt werden. Dieser lautet

$$P_{dyn_{rot}} \cdot \eta_R = P_{dyn_{trans}}$$

, wobei $P_{dyn_{rot}}$ die transformierte dynamische Leistung, $P_{dyn_{trans}}$ die dynamische Leistung in Bewegungsrichtung des Fahrzeuges und η_R den Wirkungsgrad verursacht durch Reibung darstellt ⁴. Durch Verwenden der Gleichungen 2.5, 2.4 auf der vorherigen Seite und $P = F \cdot v$ ergibt sich der Zusammenhang

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \frac{F \cdot v}{\eta_R}$$

für die Näherung, dass die Richtung der Kraft mit der Bewegungsrichtung übereinstimmt. Ist, wie in diesem Fall, der Vektor der Winkelgeschwindigkeit senkrecht zum Vektor des Radius des Antriebsrades definiert, gilt für die Geschwindigkeit v die Gleichung

⁴ Auch hier ist der Energiefluss vom Antrieb in Richtung Abtrieb gerichtet und muss im umgekehrten Fall mit dem reziproken Wert des Wirkungsgrades multipliziert werden.

chung

$$v = \omega \cdot r \quad (2.8)$$

. Der Zusammenhang vereinfacht sich dadurch zu

$$J \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{F \cdot v}{\eta_R} \cdot \frac{r^2}{v}$$

. Durch die Näherung, dass die Bewegungsrichtung mit der Kraftrichtung übereinstimmt, gilt der Zusammenhang

$$F = m \cdot a$$

. Damit und mit $a = \frac{dv}{dt}$ ergibt sich schlussendlich

$$J'_{trans-rot} = J = \frac{m \cdot r^2}{\eta_R} \quad (2.9)$$

, womit die translatorische Bewegung des Fahrzeuges in eine rotatorische Bewegung umgerechnet werden kann. Soll das Ersatzträgheitsmoment durch Verwendung einer Übersetzung auf die Antriebsseite bezogen werden, muss dieses anschließend mittels der Gleichung 2.7 auf der vorherigen Seite umgerechnet werden, was zu

$$J'_{trans-rot-rot} = \frac{m \cdot r^2}{i_G^2 \cdot \eta_R \cdot \eta_G} \quad (2.10)$$

führt.

Nach Bestimmung der Ersatzträgheiten können die einzelnen, auf die Antriebsseite bezogenen, Trägheitsmomente mit

$$J_{ges} = \sum_{v \in \mathbb{N}} J'_v \quad (2.11)$$

aufsummiert werden.

2.1.2 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand für eine turbulente Strömung kann nach

$$F_{Luft} = c_W \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.12)$$

berechnet werden. Dabei bezeichnet c_W den Luftwiderstandsbeiwert, A die Fahrzeugstirnfläche und ρ die Dichte der Luft. Steht der Hebelarm senkrecht zum Strömungswiderstand, ergibt sich mit $M = F \cdot r$ der Zusammenhang

$$M_{Luft} = c_W \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot r \quad (2.13)$$

für das zur Überwindung des Strömungswiderstandes nötige Drehmoment. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt sich mittels der Gleichungen 2.8 auf der vorherigen Seite und 2.6 auf Seite 6 aus der Drehzahl des Antriebes.

2.1.3 Längsstabilität des Fahrzeuges beim Bremsvorgang

Um die Fahrbarkeit im Falle des elektrischen Bremsens beurteilen zu können, ist ein gewisses Grundwissen über die Stabilität eines Fahrzeuges bei einem Bremsvorgang notwendig. Die Stabilität des Fahrzeuges hängt dabei von der vom Fahrer initiierten Abbremsung

$$z = \frac{-a_x}{g} \quad (2.14)$$

, die das Verhältnis von negativer Beschleunigung im Verhältnis zur Erdbeschleunigung darstellt, und der Bremskraftverteilung am Fahrzeug ab. Erfolgt ein zu starkes Abbremsen des Fahrzeuges, bestimmt dessen Verteilung seine Reaktion. Erfolgt ein Überbremsen der Vorderachse, verliert das Fahrzeug seine Lenkbarkeit und kann aufgrund des dadurch entstehenden Untersteuerns dem Kurvenverlauf nicht mehr folgen. Wird die Hinterachse überbremst, wird das Fahrzeug instabil, was in Kurven zum Schleudern des Fahrzeuges führen kann. Blockieren alle Räder des Fahrzeuges, rutscht es bei Kurvenfahrt seitlich weg. Ein Überbremsen einer Achse findet statt, wenn die Räder der Achse die Kraftschlussgrenze überschreiten. Dies ist der Fall, wenn der Kraftschluss der Vorderachse μ_V , bzw. der Hinterachse μ_H , den Haftbeiwert μ_h überschreitet. Dieser ist einerseits von der Beschaffenheit der Straße und andererseits auch von der Geschwindigkeit abhängig. Ohne Antiblockiersystem blockieren die Räder des Fahrzeuges durch ein zu starkes Bremsen des Fahrers, wobei das Fahrzeug durch die korrekte Wahl der Bremskraftverteilung trotzdem stabil bleiben muss.

Die Bremskraftverteilung ist dabei von der Lage des Fahrzeugschwerpunktes abhängig. Relevant sind neben der Höhe des Schwerpunktes über Grund h_S die horizontalen Abstände des Schwerpunktes zur Vorderachse l_{S_V} und zur Hinterachse l_{S_H} . Der Radstand ergibt sich aus $l = l_{S_V} + l_{S_H}$. Damit ergeben sich die relativen statischen Radlasten aus dem Verhältnis der horizontalen Abstände zum gesamten Radstand. Wird das Fahrzeug abgebremst, kommt noch ein dynamischer Anteil hinzu. Je stärker das Fahrzeug abgebremst wird, desto stärker wird die Vorderachse belastet und die Hinterachse entlastet. Die optimale, also ideale, Bremskraftverteilung berechnet sich bei Vernachlässigung

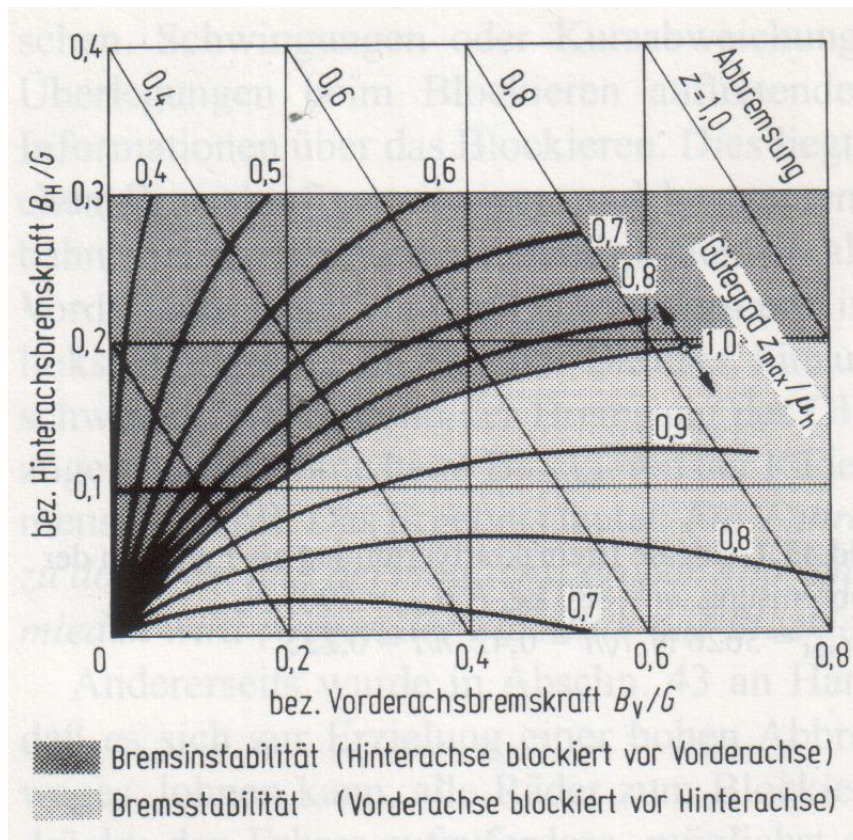


Abbildung 2.1: Bremskraftverteilung am Kraftfahrzeug [9, Seite 202]

des Auftriebes an den einzelnen Achsen nach [9, Seite 200] zu

$$\frac{B_{V_{id}}}{B_{H_{id}}} = \frac{\frac{l_{SH}}{l} + \frac{h_S}{l} \cdot z}{\frac{l_{SV}}{l} - \frac{h_S}{l} \cdot z} \quad (2.15)$$

, wobei $B_{V_{id}}$ bzw. $B_{H_{id}}$ die jeweiligen negativen Bremskräfte an Vorder- und Hinterachse darstellen. Anhand des in Abbildung 2.1 dargestellten Verhältnisses zwischen der auf die Gewichtskraft F_G des Fahrzeuges bezogenen Hinterachs-Bremskraft $\frac{B_H}{F_G}$ und der ebenfalls auf die Gewichtskraft bezogenen Vorderachskraft $\frac{B_V}{F_G}$ erkennt man, dass dabei ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Vorderachs-Bremskraft und Hinterachs-Bremskraft entsteht⁵. Je stärker man also abbremst, desto stärker muss aufgrund ihrer Entlastung die Bremskraft der Hinterräder sinken, um die Stabilität des Fahrzeuges zu erhalten. In der Praxis ist die ideale Verteilung nur mit Hilfsmitteln wie einer *Elektronischen Bremskraftverteilung* zu erreichen. Ohne dieses System kann vielmehr eine feste bzw. abgeknickte Bremskraftverteilung verwendet werden, deren prinzipielle Kennlinie im Vergleich mit der idealen Kennlinie in Abbildung 2.2 auf der nächsten Seite dargestellt wird. Die feste Bremskraftverteilung arbeitet wie der Name schon sagt mit einem

⁵ In der Abbildung 2.1 wird statt F_G das Formelzeichen G für die Gewichtskraft verwendet. Die Kurve mit dem Gütegrad $\frac{z_{max}}{\mu_h} = 1$ stellt die ideale Verteilung dar. Die Darstellung erfolgt in der Quelle normiert auf die Abbremmung z .

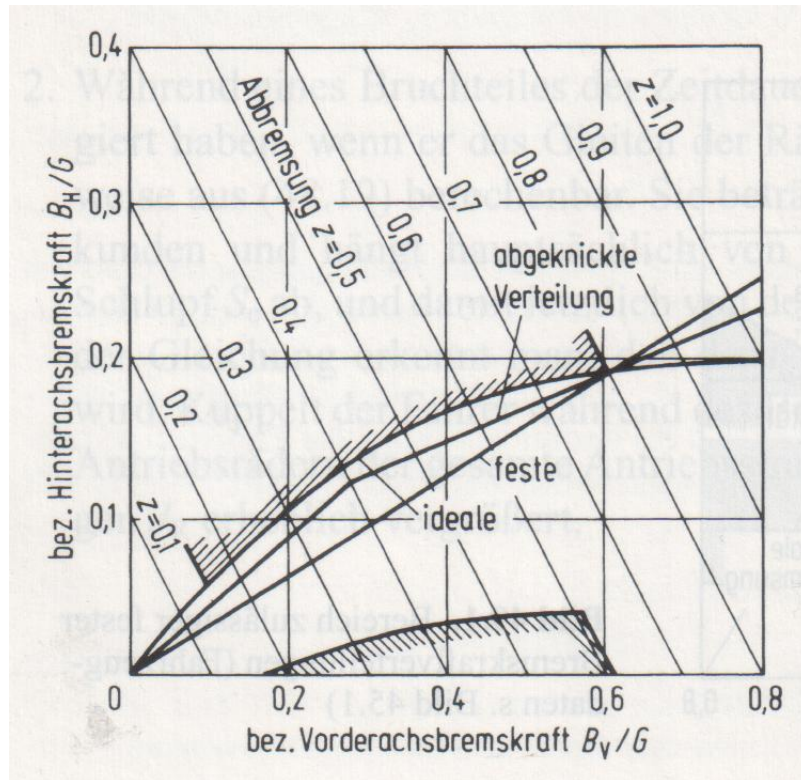


Abbildung 2.2: Feste und abgeknickte Bremskraftverteilung [9, Seite 218]

festen Verhältnis von vorderer zu hinterer Bremskraft, wogegen dieses Verhältnis bei der abgeknickten Verteilung nicht konstant ist. Auffällig ist die Lage beider Verteilungen unterhalb der idealen Kennlinie aufgrund der gewünschten Stabilität beim Bremsen. Die Bremskraft der Hinterachse lässt sich bei fester Verteilung aus der Gesamtbremskraft F_B bzw. der Gewichtskraft des Fahrzeuges und Gleichung 2.14 auf Seite 8 über

$$B_H = i_B \cdot (B_V + B_H) = -i_B \cdot F_B = -i_B \cdot m \cdot a_B = i_B \cdot m \cdot g \cdot z = B_H = i_B \cdot F_G \cdot z \quad (2.16)$$

direkt aus dem Verhältnis i_B berechnen. Auf eine Darstellung der Berechnungsgrundlage der abgeknickten Bremskraftverteilung wird hier verzichtet.

Für die Rekuperation ist weiterhin die Verknüpfung von Pedalweg und Abbremsung von Interesse. Der Zusammenhang wird in Abbildung 2.3 auf der nächsten Seite dargestellt. Im Gegensatz zum Serienfahrzeug ist, nachdem der Totpunkt überschritten wurde, ein linearer Zusammenhang zwischen Pedalweg und der Abbremsung erkennbar, da in der Regel keine Verstärkung der Bremskraft des Fahrers mithilfe eines Bremskraftverstärkers erfolgt [15, Seite 110].

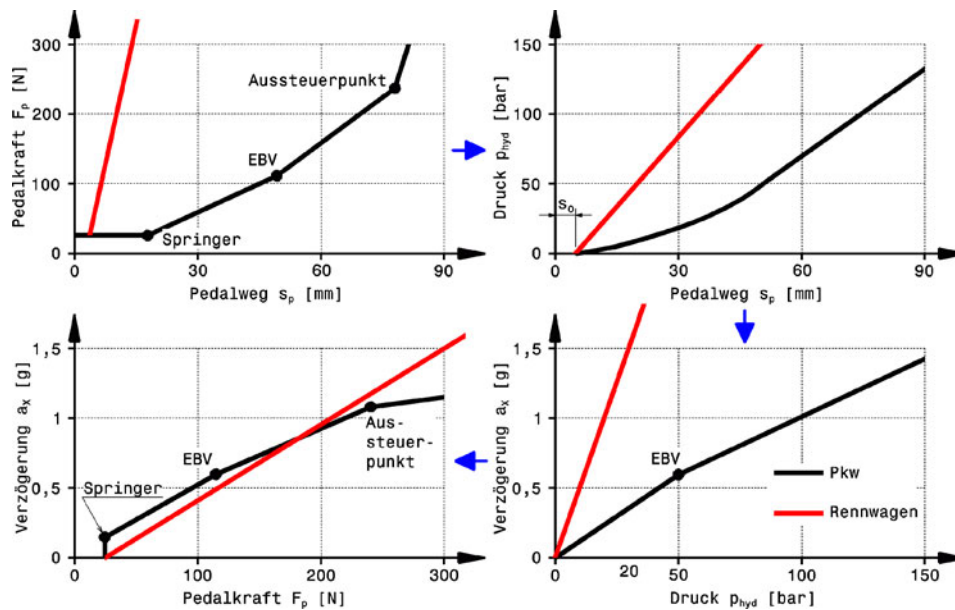


Abbildung 2.3: Zusammenhang Pedalweg-Abbremsung [15, Seite 110]

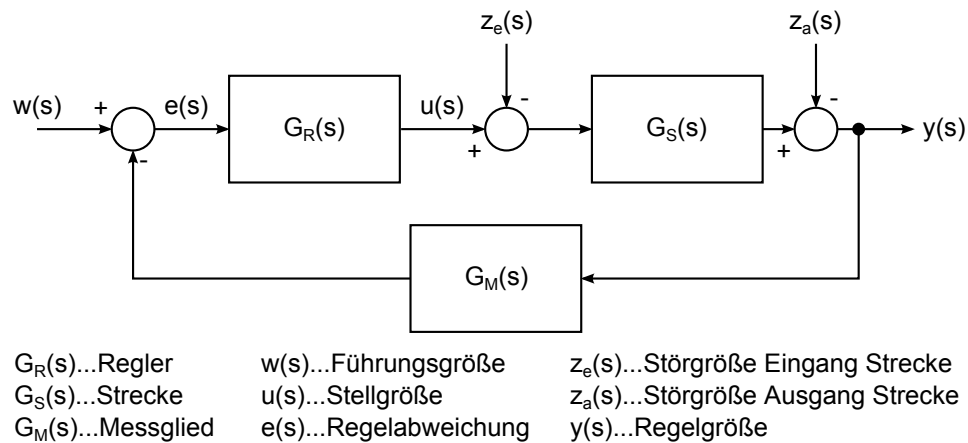


Abbildung 2.4: Regelkreis

2.2 Regleroptimierung

Unter den zahlreichen Verfahren der Reglerauslegung sollen aus Übersichtsgründen an dieser Stelle nur die Auslegung nach dem Betrags- sowie dem symmetrischen Optimum behandelt werden. Nach [14, Seite 47] werden diese beiden Verfahren bevorzugt in der elektrischen Antriebstechnik verwendet und sind somit grundsätzlich für die Anwendung am Antriebteststand geeignet. Die Erläuterungen stützen sich dabei auf den in Abbildung 2.4 dargestellten Standardregelkreis.

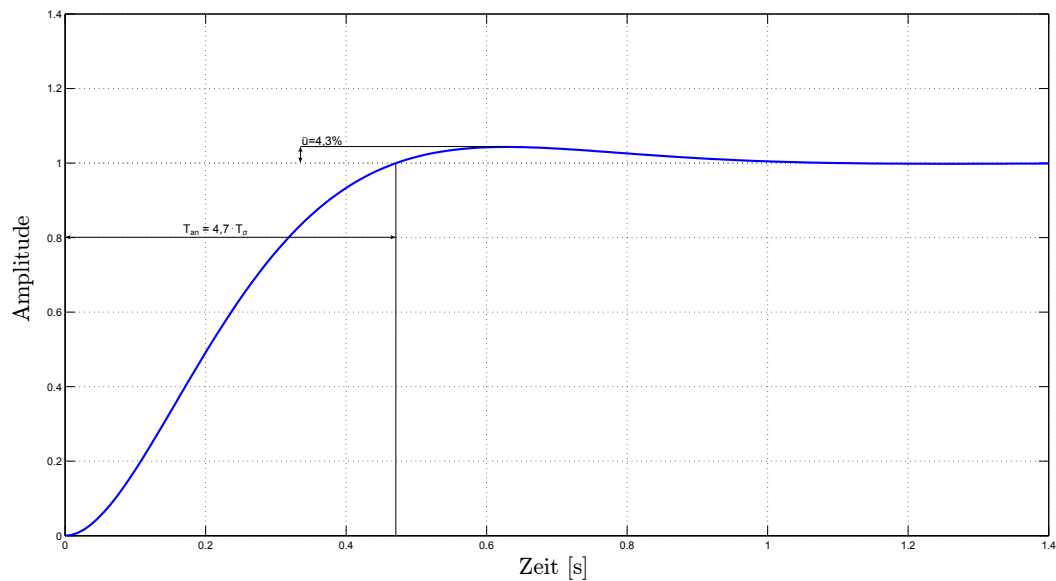


Abbildung 2.5: Sprungantwort Führungsübertragungsfunktion - Betragsoptimum

2.2.1 Betragsoptimum

Die Optimierung eines Reglers mit dem Betragsoptimum hat ein schnelles Nachregeln des Sollwertes bei gleichzeitig geringem Überschwingen zum Ziel. Dies bedingt allerdings gleichzeitig eine eher träge Reaktion auf Störungen. Die Übergangsfunktion hat nach Optimierung eine Überschwingweite von $\ddot{u} = 4,3\%$ bei einmaligem Überschwingen und eine Anregelzeit von $T_{an} = 4,7 \cdot T_\sigma$ mit der Ersatzzeitkonstante T_σ [18, Seite 241]⁶. Dies ist in Abbildung 2.5 als Beispiel für $K_S = 2$, $T_1 = 1\text{ s}$ und $T_\sigma = 0,1\text{ s}$ dargestellt. Um einer Sollwertfunktion schnell und mit wenig Verzögerung folgen zu können, ist das Ziel die Verstärkung der Führungsübertragungsfunktion über einen möglichst großen Frequenzbereich nahe Eins und die Phase so gering wie möglich zu halten.

Standardmäßig wird diese Optimierung bei Regelstrecken verwendet, die aus mehreren Verzögerungsgliedern bestehen, welche somit eine Übertragungsfunktion der Form

$$G_S(s) = K_S \cdot \frac{1}{s \cdot T_1 + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot T_\sigma + 1} \quad (2.17)$$

besitzen, wobei K_S die Streckenverstärkung, T_1 die dominante Zeitkonstante und T_σ die Ersatzzeitkonstante⁷ der übrigen Verzögerungsglieder darstellt. Häufig wird als Regler ein PI-Regler eingesetzt, der eine stationäre Störung komplett ausregeln kann. Dieser

⁶ In der Quelle erfolgt die Berechnung anhand der Zeitkonstante T_1 . Diese ist dort aber als Ersatzzeitkonstante definiert.

⁷ [14, Seite 47] nennt einen Faktor von 5 zwischen dominanter Zeitkonstante und der Ersatzzeitkonstante, ab der ein Zusammenfassen ohne signifikante Änderung des Verhaltens des Regelkreises im relevanten Frequenzbereich möglich ist.

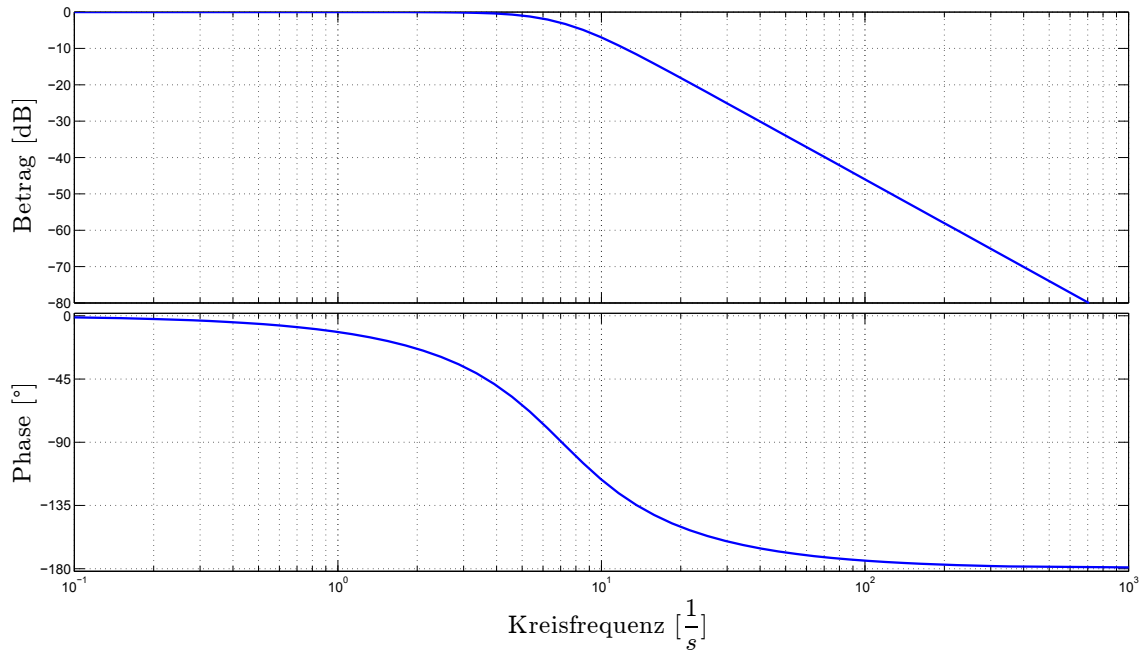


Abbildung 2.6: Amplituden-/Phasengang Führungsübertragungsfunktion - Betragsoptimum

besitzt die Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{1 + s \cdot T_N}{s \cdot T_N} \quad (2.18)$$

und kann somit durch geeignete Wahl seiner Parameter die obigen Anforderungen erfüllen. Setzt man seine Nachstellzeit

$$T_N = T_1 \quad (2.19)$$

, so wird die Dynamik und damit der Frequenzbereich, in der seine Verstärkung nahezu ideal ist, durch Kompensation der dominanten Zeitkonstante T_1 erhöht bzw. vergrößert. Bei Vorhandensein einer zweiten dominanten Zeitkonstante kann diese mithilfe des zusätzlichen Vorhalts eines PID-Reglers kompensiert werden. Der enthaltene D-Anteil hat allerdings Nachteile in Bezug auf die Reaktion des Reglers auf höherfrequente Störungen an seinem Eingang. Für die optimale Verstärkung der Führungsübertragungsfunktion sollte die Reglerv Verstärkung auf

$$V_R = \frac{T_1}{2 \cdot K_0 \cdot T_\sigma} \quad (2.20)$$

eingestellt werden, wobei die Verstärkung des offenen Kreises K_0 aus der Verstärkung der Strecke und eines eventuell vorhandenen Messgliedes besteht. Die Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft den Amplituden- und Frequenzgang des geschlossenen Kreises für $K_S = 2$, $T_1 = 1 \text{ s}$ und $T_\sigma = 0,1 \text{ s}$. Daran ist deutlich der Amplitudengang von 0 dB bis zur Knickfrequenz und der danachfolgende Abfall mit $-40 \frac{\text{dB}}{\text{dek}}$ zu erkennen.

Ein häufiger Anwendungsfall für das Betragsoptimum ist der Stromregelkreis einer Gleichstrommaschine.

2.2.2 Symmetrisches Optimum

Enthält die Regelstrecke ein I-Glied, kann bei Optimierung mit dem Betragsoptimum nur ein P- bzw. PD-Regler eingesetzt werden. Dies hat allerdings den Nachteil, dass der in der Strecke enthaltene I-Anteil eine vor der Regelstrecke einsetzende Störung nicht ausregeln kann [14, Seite 60]. Der Einsatz eines PI-Reglers, der nach dem Betragsoptimum parametrisiert wurde, ist nicht möglich, da der offene Kreis durch die Kompensation der dominanten Zeitkonstante eine konstante Phase von $\phi = 180^\circ$ besitzt und damit instabil ist. Die Optimierung kann für Strecken der Form

$$G_S(s) = \frac{K_S}{s \cdot T_1} \cdot \frac{1}{s \cdot T_\sigma + 1} \quad (2.21)$$

allerdings mit einem PI-Regler nach dem symmetrischen Optimum erfolgen, wobei K_S die Streckenverstärkung, T_1 die Zeitkonstante des I-Anteils und T_σ die Ersatzzeitkonstante darstellt. Strecken mit mehreren Verzögerungsgliedern müssen zur Anwendung der Optimierung dabei angenähert werden, was nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Nach [18, Seite 242] kann ein zusätzliches schnelleres PT1-Glied bei einem Verhältnis der Zeitkonstanten von $\frac{1}{5}$ zusammen mit der Ersatzzeitkonstante zu einer Summenzeitkonstante zusammengefasst werden. Liegen die Zeitkonstanten näher zusammen ist der Einsatz eines PID-Reglers zu empfehlen, dessen zweiter Vorhalt die zusätzliche Zeitkonstante der Strecke kompensieren kann.

Durch die Optimierung nach dem symmetrischen Optimum können auch Störungen am Streckeneingang ausgeglichen werden. Dieses ist durch ein schnelles Ausregeln von Störungen, aber starkem Überschwingen bei Sollwertsprüngen gekennzeichnet. Dies zeigt sich in der Übergangsfunktion mit einer großen Überschwingweite von $\ddot{u} = 43,4\%$ bei mehrmaligem Überschwingen und einer Anregelzeit von $T_{an} = 3,1 \cdot T_\sigma$ bei Standardparametrierung [14, Seite 62]. Zur Verbesserung des Führungsverhaltens bei gleichzeitig gutem Störverhalten empfiehlt [14, Seite 62 bzw. 98ff] einen Sollwertvorfilter, der hier aber nicht näher betrachtet wird. Um einen PI-Regler bei gleichzeitiger Stabilität der Strecke verwenden zu können, erfolgt keine Kompensierung der dominanten Zeitkonstante wie beim Betragsoptimum, sondern ein Verschieben des Vorhaltes des Reglers zu Frequenzen unterhalb der Ersatzzeitkonstante. Dies wird durch Einstellen der Nachstellzeit auf

$$T_N = a^2 \cdot T_\sigma; a \geq 1 \quad (2.22)$$

erreicht, mit dem Parameter a , der die Überschwingweite und die Anregelzeit des Führungs- und Störverhaltens, sowie die Höhe und Bandbreite der Phasenreserve beeinflusst. Ei-

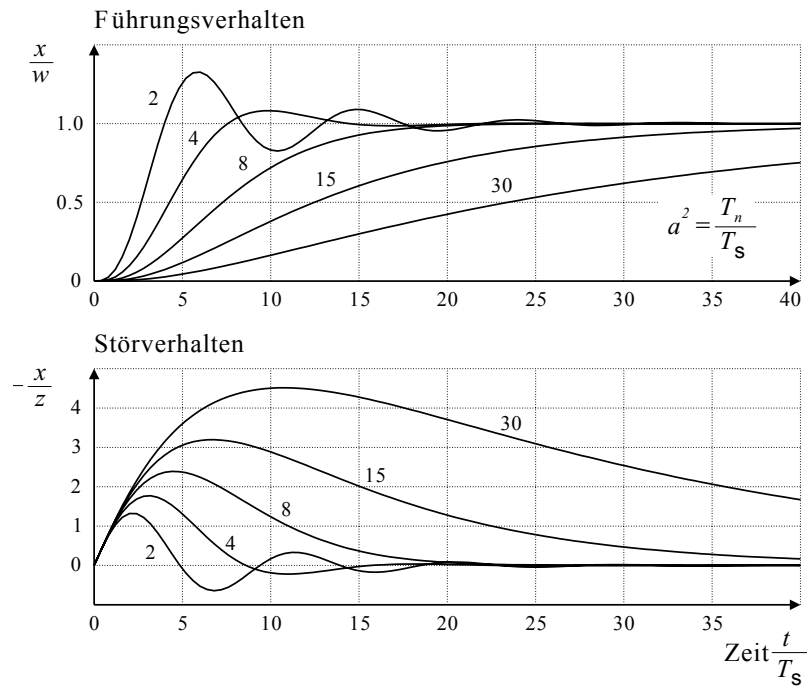


Abbildung 2.7: Sprungantwort Führungs-/Störübertragungsfunktion - Symmetrisches Optimum [14, Seite 66]

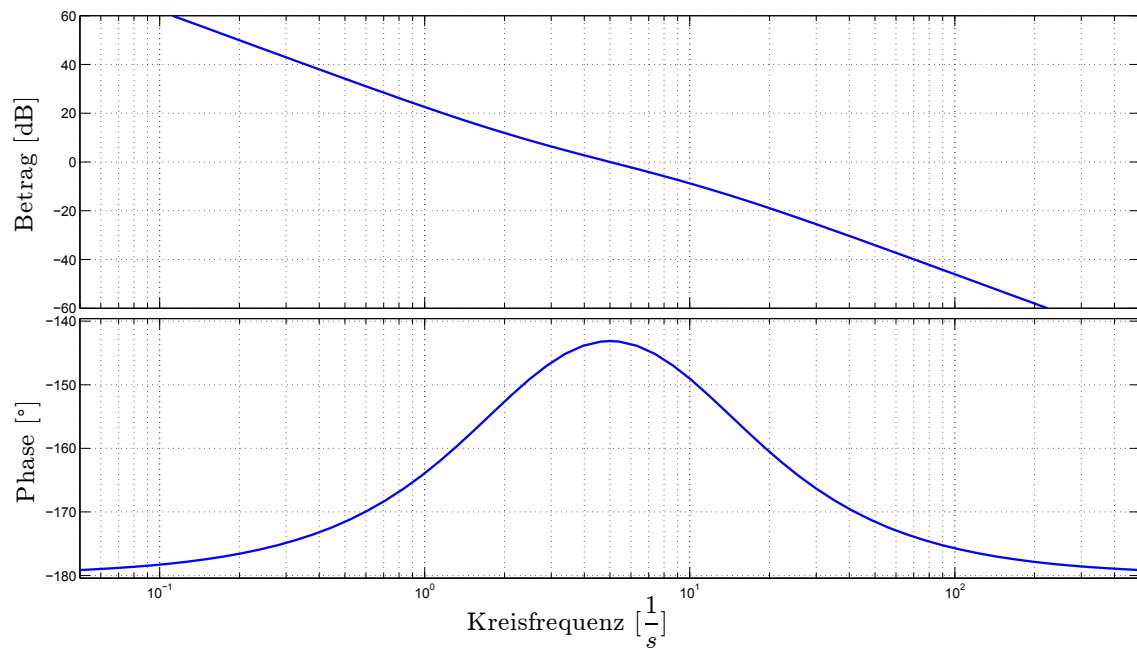
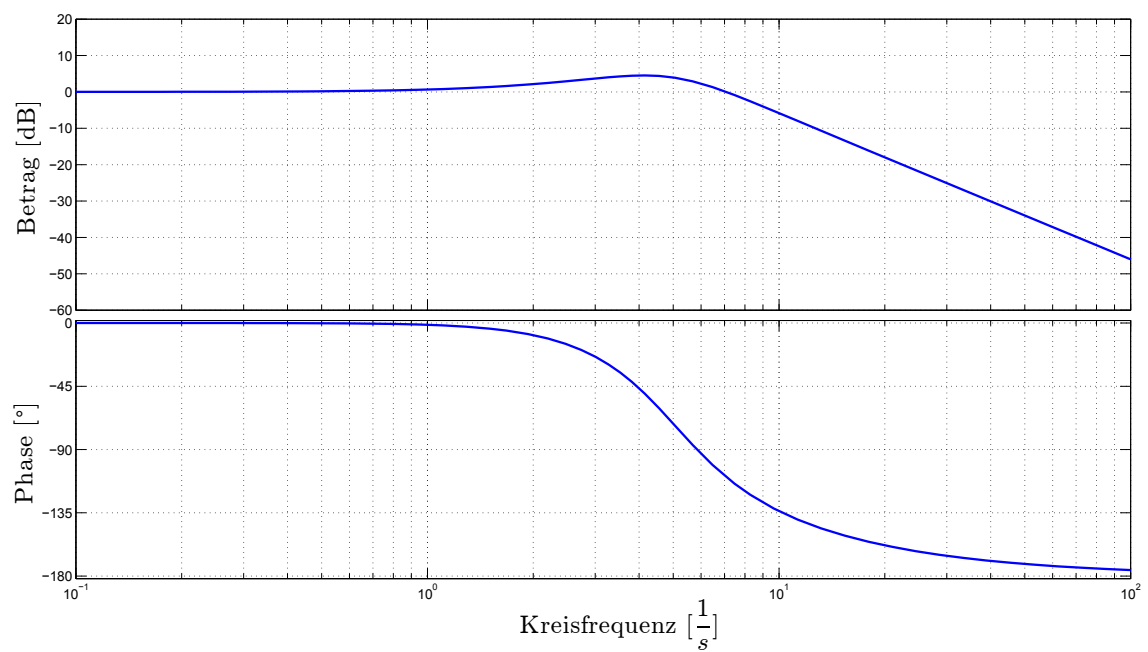
ne Darstellung erfolgt in Abbildung 2.7⁸. Die vorher betrachtete Überschwingweite und Anregelzeit für Standardparametrierung ist bei $a = 2$ zu sehen. Durch die Wahl des Vorhalts entsteht eine Überhöhung des Phasenganges oberhalb der Stabilitätsgrenze, wobei die Durchtrittsfrequenz durch Einstellen der Reglerverstärkung zu

$$K_R = \frac{T_1}{a \cdot K_0 \cdot T_\sigma} \quad (2.23)$$

auf das Maximum der Phasenreserve festgelegt wird. Dabei besteht die Verstärkung des offenen Kreises K_0 aus der Verstärkung der Strecke und einem eventuell vorhandenen Messglied. Wie in Abbildung 2.8 auf der nächsten Seite zu sehen ist, liegt die Summenzeitkonstante im offenen Kreis mit der Zeitkonstante des Reglervorhalts symmetrisch zur Durchtrittsfrequenz und die maximale Phasenreserve wird bei der Durchtrittsfrequenz erreicht. Wie in Abbildung 2.9 auf der nächsten Seite zu sehen ist, beträgt die Verstärkung der Führungsübertragungsfunktion unterhalb der Ersatzzeitkonstante etwa 0dB , analog zum Betragsoptimum. Die Standardparametrierung mit $a = 2$ verursacht allerdings eine geringere Dämpfung, weswegen es zu einer Überhöhung kommt.

Ein häufiger Anwendungsfall für das symmetrische Optimum ist der dem Stromregelkreis überlagerte Drehzahlregelkreis einer Gleichstrommaschine.

⁸ Dabei ist für das Störverhalten zu beachten, dass entgegen dem in der Arbeit genutzten Streckenmodell nach Abbildung 2.4 auf Seite 11 die Störung nach dem Verzögerungsglied, aber vor dem I-Glied der Strecke einwirkt. Dies verursacht ein unverzögertes Einwirken der Störung, der I-Anteil der Strecke ist aber nicht fähig diese auszuregeln.


 Abbildung 2.8: Amplituden-/Phasengang Offener Kreis - Symmetrisches Optimum $a = 2$

 Abbildung 2.9: Amplituden-/Phasengang Führungsübertragungsfunktion - Symmetrisches Optimum $a = 2$

3 Sicherheitskonzept des Antriebsstranges

Am Teststand bzw. am Rennfahrzeug sind eine Vielzahl von Gefahren möglich. Diese können zu Beeinträchtigungen oder zu Sachschäden führen. Der weitaus schlimmere Fall ist jedoch die Gefährdung von Menschenleben im oder am Fahrzeug bzw. am Teststand. Wird das Rennfahrzeug auf einem Rennen der FORMULA STUDENT ELECTRIC (FSE) oder auf einem anderen publikumswirksamen Event wie dem Rollout oder Showfahrten eingesetzt ist zudem mit einer großen Anzahl gefährdeter Personen zu rechnen. Für die elektrische Sicherheit der Energieversorgung des Teststandes wird auf eine im Vorfeld dieser Masterarbeit erfolgte Belegarbeit verwiesen, in der deren Planung ausführlich beschrieben wurde [10]. Aufgrund des Umfangs eines generellen Sicherheitskonzeptes erfolgt in dieser Arbeit nur eine Bewertung der Gefahren, die im Zusammenhang mit dem Antriebsstrang stehen.

3.1 Gefahrenanalyse

Die Gefahren des Antriebssystems sind einerseits elektrischer Natur, andererseits bildet aber auch der mechanische Teil des Antriebes eine nicht unerhebliche Gefahrenquelle. Es kann weiterhin zwischen Gefahren am Teststand, Gefahren am Rennfahrzeug und Gefahren die beide gleichzeitig betreffen unterschieden werden.

3.1.1 Gefahrenanalyse am Teststand und am Rennfahrzeug

Ein aktives Tractive System (TS) birgt mehrere Gefahren. Als TS werden dabei im Regelwerk der FSE alle Stromkreise mit einer Nenngleichspannung über 60V bzw. Nennwechselspannung über 25V bezeichnet. Am Teststand, wie auch am Rennfahrzeug können aktive Teile des TS berührt werden, was bei Berührung beider Pole oder bei Berührung eines Poles, dem Fahrzeugrahmen und gleichzeitigem Isolationsfehler schwerwiegende Verletzungen nach sich ziehen kann. Weiterhin ist es bei Kontakten, die werkzeuglos demontierbar sind, einfach möglich diese unabsichtlich während aktivem TS zu trennen⁹. Hier besteht die Gefahr eines Lichtbogens, was im Bereich der Gleichspannungsverdrahtung des TS noch kritischer ist. Allerdings ist nur die Maschine selbst werkzeuglos trennbar. Eine größere elektrische Last tritt an dieser Verbindung nur während der Fahrt oder mit blockierter Antriebsachse und einer Drehmomentanforderung auf. Der Antrieb wurde als Komplettsystem zugekauft. Seine Absicherung erfolgt durch die Invertersoft- bzw. -hardware. Eine Ausnahme bildet die Überwachung des Iso-

⁹ Die Trennung ist natürlich auch bei Kontakten möglich, die nur mit Werkzeug trennbar sind. Aufgrund des höheren Aufwandes ist die Wahrscheinlichkeit eines unüberlegten Abtrennens aber sehr gering.

lationswiderstandes, was durch den Nutzer des Systems erfolgen muss ¹⁰. Kurzschlüsse im Gleichstromsystem müssen selbst abgesichert werden. Weiterhin ist es möglich die Pole des TS bzw. des Grounded Low Voltage System (GLVS) zu vertauschen ¹¹. Dies führt zu schweren Beschädigungen im Antriebssystem oder an der Peripherie und kann zu Personenschäden durch Lichtbögen führen.

Das GLVS muss aktiv sein, bevor eine Aktivierung des TS möglich ist. Essentielle Sicherheitselemente und die Fahrzeugsteuerung, die das System überwachen, wären sonst spannungslos. Weiterhin besteht die Gefahr der Beschädigung des internen Gleichspannungswandlers (DCDC-Wandler).

Ein Ausfall der Kühlung oder eine außergewöhnlich hohe Außentemperatur gefährden den Inverter und die Maschine. Tritt dieser Fall bei hoher Last ein, kann dies zu Schäden oder sogar zur Zerstörung der entsprechenden Komponenten führen. Für eine genauere Betrachtung muss zwischen dem Betrieb am Fahrzeug und dem Betrieb am Teststand unterschieden werden. Dies erfolgt für den Teststandsbetrieb im Abschnitt 3.2.3 auf Seite 22 und für den Betrieb im Rennfahrzeug im Abschnitt 3.2.2 auf Seite 22. Die Gefahr, dass ein vom Fahrer nicht gewünschtes Moment an der Antriebsachse anliegt, wird aufgrund der unterschiedlichen Szenarien für Teststand und Rennfahrzeug ebenfalls in den genannten Abschnitten thematisiert.

3.1.2 Gefahrenanalyse am Rennfahrzeug

Am Rennfahrzeug ergeben sich zusätzliche Gefahren, die am Teststand so nicht auftreten können. So müssen am Fahrzeug während der gesamten Saison Arbeiten durchgeführt werden, was das Risiko eines elektrischen Schlages erhöht. Am Teststand hingegen sind nach fertiger Installation kaum Anpassungen nötig. Dies beinhaltet auch Arbeiten, die nicht das TS betreffen, und auch durch Personen erfolgen, die keine elektrischen Fachkräfte sind. Sie sind sich der erhöhten Gefahr von Arbeiten an Gleichspannungssystemen dieser Spannungshöhe oftmals nicht bewusst. Kleinere Beschädigungen durch Werkzeuge, die an den gewohnten Gleichspannungssystemen mit niedriger Spannung ohne größere Folgen bleiben, haben hier fatale Auswirkungen. Aus diesem Grund ist das Risiko des elektrischen Schlages durch das TS noch einmal aufgeführt, allerdings mit einer erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeit.

Im Falle eines Crashes geht eine erhöhte Gefahr eines elektrischen Schlages vom TS aus, vor allem für den Fahrer selbst, aber auch für Personen die Erste Hilfe leisten möchten. Dies wird in der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit am Rennfahrzeug gesondert berücksichtigt.

¹⁰ Der in der FSE vorgeschriebene Isolationswächter vom Typ BENDER ISOMETER IR155-3203/3204 überwacht den Isolationswiderstand auf der Gleich- und Wechselspannungsseite [6, Seite 2].

¹¹ Das GLVS beinhaltet alle Stromkreise, die aufgrund ihrer Eigenschaften nicht zum TS gehören.

Vom Antriebssystem geht im Fehlerfall eine hohe Brandgefahr aus. Die Gefahr des Auftretens eines Lichtbogens besteht am Teststand wie am Rennfahrzeug und wird deswegen im Abschnitt 3.1.1 auf Seite 17 behandelt. Die Gefahr, welche vom Austritt von Kühlmittel ausgeht, wird am Ende dieses Abschnittes behandelt. Die thermisch kritischste Komponente des Fahrzeuges stellt der Akkumulator dar. Eine Beschädigung der Zellen führt zu einer thermischen Zerstörung des Akkumulators¹², genauso wie die thermische Überlastung einzelner Zellen, aufgrund zu hoher Leistungsabgabe im Rennbetrieb. Dies ist unbedingt zu vermeiden, da große Sachschäden auch an umstehenden Fahrzeugen sowie schwere Verbrennungen bei Personen die Folge sein können.

Äußerst kritisch ist die Gefahr durch ungewolltes Beschleunigen bzw. Rekuperieren zu bewerten, was beispielsweise durch Fehler im Algorithmus der Sollmomentberechnung verursacht werden kann. Plötzliches Beschleunigen kann das Fahrzeug unkontrollierbar werden lassen, was neben Fahrzeugschäden auch zu schweren Schäden bei Personen, die sich außerhalb des Fahrzeuges befinden und dem Fahrer selbst führen kann. Plötzliches Rekuperieren kann den Fahrer im Rennbetrieb zu einer nicht zur Fahrsituation passenden Reaktion verleiten und damit ebenfalls zu einem unkontrollierbaren Fahrzeug führen. In bestimmten Fehlerfällen schließt der Inverter die verwendete permanenterregte Synchronmaschine kurz. Das dadurch einsetzende Bremsmoment kann die Stabilität des Fahrzeuges gefährden oder einen unvorbereiteten Fahrers zu einer Reaktion verleiten, die zu einem instabilen Fahrzeug führt. Die Komplexität dieses Fehlers zeigt sich daran, dass er durch mehrere Komponenten verursacht werden kann. Die Pedaleinheit, bestehend aus *torque* und *brake encoder*, kann defekt sein bzw. implausible Werte liefern. Weiterhin kann die Fahrzeugsteuerung fehlerhafte Sollwerte an den Antrieb übergeben. Auch der Antrieb kann falsche Drehmomente stellen, die nicht von der Vehicle Control Unit (VCU) vorgegeben wurden. Der Antrieb besitzt allerdings ein Sicherheitssystem, um diesen Fehler zu behandeln. Neben den Komponenten selbst kann auch die Kommunikation zwischen den Komponenten fehlerhaft sein und muss dementsprechend abgesichert werden.

Ein Ausfall des Bremszylinders oder anderer Teile der mechanischen Bremse sowie der Ausfall der elektrischen Bremse bergen ein hohes Gefährdungspotential. Dies kann das Fahrzeug, aber vor allem anwesende Personen ernsthaft gefährden, sollte keine Auslaufstrecke vorhanden sein. Je nach Konfiguration von mechanischer Bremse und Rekuperation ist bei einer Notbremsung für das gleiche Bremsmoment ein deutlich größerer Pedalweg nötig, was für den Fahrer nicht sofort ersichtlich ist. Dies führt bei einem untrainierten Fahrer zu einer mitunter entscheidenden zeitlichen Verzögerung.

Das hohe Drehmoment, was die Maschine über einen weiten Drehzahlbereich liefern kann, aber vor allem die schnelle Reaktion auf Sollwerte stellen eine hohe Belastung für den mechanischen Antriebsstrang dar. Treten unvorhergesehene Beanspruchungen auf, kann dies zur Zerstörung des Antriebsstranges und zur Verletzung in der Nähe des

¹² Ein realistisches Szenario wäre beispielsweise ein Unfall des Fahrzeuges.

Fahrzeugs stehender Personen führen. Das dadurch plötzlich abreißende Gegenmoment in Form der Trägheit des Fahrzeuges und des Antriebsstranges kann dann eine Zerstörung der Maschine selbst zur Folge haben. Im Falle eines Unfalles kann bei aktivem TS der sich noch drehende Antriebsstrang erhebliche Verletzungsgefahr bergen.

Am Rennfahrzeug erfolgt eine auf Gewicht und Größe optimierte Auslegung der Kühlung, bei stark streckenabhängiger Umgebungstemperatur. Die Wahrscheinlichkeit für eine Leistungsreduktion oder einem Ausfall der Kühlung ist dadurch gegenüber dem Teststand erhöht. Durch die Nähe zum Fahrer besteht bei Ausfall der Kühlung die Gefahr, dass durch den starken Temperaturanstieg Teile der Kühlung beschädigt werden können. Durch die hohe Temperatur des eventuell austretenden Kühlmittels kann der Fahrer oder umstehende Personen ernsthaft verletzt werden.

3.1.3 Gefahrenanalyse am Teststand

Am Teststand kommen neben den durch den Aufbau verursachten Gefahren auch Gefahren bezüglich der Standortwahl hinzu.

Da die mechanische Trägheit am Teststand sehr niedrig ist und durch die zweite Maschine nur nachgebildet wird, besteht die Gefahr, dass beide Maschinen kurzzeitig im Motorbetrieb bei hohem Moment arbeiten. Dies ist umso kritischer, wenn man die hohe Leistung der Antriebe bedenkt. Dies hat ein schnelles Ansteigen der Systemdrehzahl zur Folge, was Beschädigungen an den Antrieben und bei Zerstörung der Maschinen auch Personenschäden hervorrufen kann, sollte die interne Drehzahlbegrenzung der Antriebe zu langsam reagieren. Weiterhin könnte die als virtuelle Trägheit genutzte Maschine ausfallen, während die Antriebsmaschine bei hohem Moment weiterläuft, was ähnliche Folgen haben können¹³. Diese können auch bei starken Lastwechseln bzw. bei hohen Drehzahlen auftreten. Auch die Aktivierung einer Maschine, ohne dass die zweite Maschine als virtuelle Trägheit genutzt wird, kann durch die schnell ansteigende Drehzahl zu Schäden am Antrieb oder zu Personenschäden führen.

Auch am Teststand besteht die Gefahr, dass die Antriebsmaschine beschleunigt bzw. bremst, ohne dass der Benutzer dies wünscht. Die Ursache für diesen Fehler unterscheidet sich nicht von den Ursachen im Rennfahrzeug, welche in Abschnitt 3.1.2 auf Seite 18 zu finden sind. Im Gegensatz zum Rennfahrzeug ist das Gefährdungspotential aufgrund der stationären Installation geringer, da die Gefahr eines unkontrollierbaren Fahrzeuges nicht besteht. Ein Irritieren des Fahrers und eine daraus folgende verspätete Reaktion haben hier keine Auswirkungen. Systemzustände, die den mechanischen Antriebsstrang zerstören könnten, wurden bereits im vorherigen Absatz betrachtet.

¹³ Dies kann mehrere Ursachen haben. Beispielsweise kann die Übertragung der Bussignale fehlerhaft sein, wodurch der Inverter die Maschine abschaltet. Aber auch fehlerhafte Zustände eines Antriebes können zu einer plötzlichen Abschaltung führen.

Das Labor, in dem der Teststand installiert wurde, wird auch als Praktikumsraum genutzt. Unachtsame Studenten könnten unbemerkt Änderungen an der Anlage durchführen oder sich durch Unachtsamkeit selbst gefährden, beispielsweise stolpern und dadurch Teile der Installation beschädigen und sich dadurch auch verletzen.

Die Anlage wird teilweise durch mehrere Mitarbeiter bedient. Dies kann bei nicht abgesprochenen Änderungen unvorhergesehene Situationen hervorrufen. Beispielsweise kann die Anlage nach Änderungen in der Steuerungssoftware anders als beabsichtigt reagieren. Allerdings werden nach Inbetriebnahme des Teststandes nur noch kleinere Anpassungen wie Parameteränderungen nötig sein. Diese können in der Benutzeroberfläche eingestellt werden, womit Änderungen am Programm nicht mehr nötig sind. Unzulässige Zustände des Teststandes, hervorgerufen durch Änderungen in der VCU, müssen durch die Teststandsoftware abgefangen werden.

Die Gefahr des Ausfalls der Kühlung besteht auch am Teststand. Hier erfolgt jedoch eine großzügige Dimensionierung der Kühlung und durch die Installation in einem Labor herrscht gleichzeitig eine nahezu konstante Raumtemperatur. Eine Leistungsreduzierung tritt hier mit großer Wahrscheinlichkeit nur bei Durchführung von Tests ein, die dieses Ziel verfolgen, wodurch das Risiko eines Ausfalles abgemindert wird. Zu Testzwecken installierte Sensoren am Teststand erhöhen jedoch wiederum das Risiko von Undichtigkeiten aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungsstellen. Weiterhin ist die Aktivierung der Kühlung teilweise nicht automatisiert. Die Ansteuerung der Kühlung wird anfangs über einen externen Stromkreis versorgt. Die Pumpen gehen bei Ausfall dieser Ansteuerung jedoch in ein Notlaufprogramm. Bestimmte Testfälle erfordern ein Abtrennen der Pumpen. In diesen seltenen Fällen ist ein Aktivieren des Teststandes durch eine andere Person ohne Kühlung aus Unwissenheit möglich.

3.2 Bewertung der Gefahren

Die Bewertung der Gefahren sollte durch ein Schema erfolgen, welches eine abschließende Beurteilung anhand einer konkreten Bewertungsgröße ermöglicht. Für die FSE muss eine Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) erstellt werden, die bauteilbezogen die Gefahren beurteilt, die bei Ausfall bzw. ihrer Fehlfunktion entstehen. Diese ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, jedoch wird das zugrunde liegende Bewertungsschema hier genutzt. Eine Bewertung erfolgt nach den folgenden drei Kriterien:

- *Sev* (Severity) - Schadensausmaß
- *Occ* (Occurrence) - Auftretswahrscheinlichkeit
- *Det* (Detection) - Entdeckungswahrscheinlichkeit

Die Bewertungsskala und ihre Bedeutung werden in Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite dargestellt. Die höchste Stufe der Schadensschwere *Sev* wird nur bei schweren Perso-

nenschäden, die zum Tod führen können, vergeben. Die Gesamtbewertung erfolgt dann nach der Gleichung $risklevel = Sev \cdot Occ \cdot Det$. In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt die Bewertung der einzelnen Fehler nach diesem System.

Rating	Severity (Sev)	Occurrence (Occ)	Detection (Det)
1	No injuries may be caused, but general safety is affected by this failure	Failure occurrence is very unlikely	Certain detection of the failure
2	Light injuries may be caused by this failure	Relatively few failure occurrence	High chance of detecting this failure
3	Medium injuries may be caused by this failure	Occasional failure occurrence	Medium chance of detecting this failure
4	Heavy injuries may be caused by this failure	Frequent failure occurrence	Low chance of detecting this failure
5	Fatal injuries may be caused by this failure	Persistent failure occurrence	Failure cannot be detected

Tabelle 3.1: Bewertungssystem der FMEA in der FSE [3, Tab 3]

3.2.1 Gefahrenbewertung am Teststand und am Rennfahrzeug

In Tabelle 3.2 auf der nächsten Seite erfolgt eine Bewertung der Gefahren, die im Rennfahrzeug und am Teststand auftreten können ¹⁴. Nach den Einzelwertungen und dem *risklevel* folgt dann im Abschnitt 3.3 auf Seite 26 die Auswahl der nötigen Maßnahmen.

3.2.2 Gefahrenbewertung am Rennfahrzeug

In Tabelle 3.3 auf Seite 24 erfolgt eine Bewertung der Gefahren, die auf das Rennfahrzeug beschränkt sind. Nach den Einzelwertungen und dem ermittelten *risklevel* erfolgt dann im Abschnitt 3.3 auf Seite 26 die Auswahl der erforderlichen Maßnahmen.

3.2.3 Gefahrenbewertung am Teststand

In Tabelle 3.4 auf Seite 25 erfolgt eine Bewertung der Gefahrenursachen, die nur am Teststand auftreten können. Nach den Einzelwertungen und dem ermittelten *risklevel* erfolgt dann im Abschnitt 3.3 auf Seite 26 die Auswahl der erforderlichen Maßnahmen.

¹⁴ Die Gefährdung durch Lichtbögen stellt bei Verpolung des TS bzw. GLVS eine besondere Gefahr dar und wird im Teil *Auftreten eines Lichtbogens* bewertet.

Bezeichnung	Sev	Begründung Sev	Occ	Begründung Occ	Det	Begründung Det	risklevel
Elektrischer Schlag durch das TS - Allgemein	5	schwere innere und äußere Verletzungen, Tod	2	Schutz durch vollständige Isolation der Komponenten des TS. Schutz durch Rahmenstruktur, Sichtprüfung vor Start	2	Isolationsüberwachung (IMD), ohne Erdschluss nur Sichtprüfung ^a	20
Auftreten eines Lichtbogens	5	schwere mechanische und elektrische Schäden, Verbrennungen, Tod, Blendung der Augen	3	Werkzeuglose Demontage nur an der Maschine selbst möglich, Absicherung durch voreilenden Kontakt im Stecker der Maschine, saubere Verlegung der TS-Verkabelung bzw. Aufbau des Akkumulators, werkzeuglos trennbare Verbinder im Bereich des GLVS üblich	5	bei Erd-/Kurzschlüssen: IMD; optisch durch Bediener, dann sind eventuelle Schäden aber schon eingetreten	75
Verpolung des TS	4	Beschädigung des TS nach Schließen der Accumulator Isolation Relays (AIR) ^b	1	Klare Kennzeichnung der Pole, Anschlüsse am Antrieb und DC-Quelle sind durch Vorkonfektionierung verpolungssicher nach Inbetriebnahme	5	Spannungsmessung am Inverter nach Verpolung (also nach Schadenseintritt)	20
Verpolung des GLVS	4	gleichzeitige Beschädigung verschiedener Komponenten des GLVS	3	Gefahr von Improvisation im GLVS bei Rennbetrieb, sorgloser Umgang mit GLVS aufgrund der geringen Spannung	5	komponentenabhängig ^c	60
Aktives TS mit inaktivem GLVS	3	Inaktivität der Steuerung und anderer Sicherheitsselemente, aber deaktivierter Antrieb; Zerstörung des DCD-Converters im Inverter möglich	1	AIRs ohne GLVS spannungslos ^d	1	AIRs lassen sich ohne Steuerspannung nicht schließen	3
Ungewolltes Beschleunigen bzw. Abbremsen des/eines Antriebes		Die Gefahrenbewertung unterscheidet sich zwischen Rennfahrzeug und Teststand und erfolgt deswegen in Tabelle 3.3 auf der nächsten Seite und Tabelle 3.4 auf Seite 25.					
Ausfall der Kühlung		Die Gefahrenbewertung unterscheidet sich zwischen Rennfahrzeug und Teststand und erfolgt deswegen in Tabelle 3.3 auf der nächsten Seite und Tabelle 3.4 auf Seite 25.					

Tabelle 3.2: Bewertung der Gefahren - allgemein

^a Bei zu geringem Isolationswiderstand löst das IMD aus und schaltet das TS ab.
^b Diese dienen dem elektrischen Abtrennen des Akkumulators vom Fahrzeug.
^c Die Gefährdung hängt stark von der getätigten Änderung der Person ab. Die Einstufung entspricht dem ungünstigsten Fall.
^d Dies gilt für die Konfiguration am Fahrzeug, wie auch am Teststand.

Bezeichnung	Sev	Begründung Sev	Occ	Begründung Occ	Det	Begründung Det	risklevel
Elektrischer Schlag durch das TS - Zusatzrisiko Wartung	5	schwere innere und äußere Verletzungen, Tod	3	Schutz durch Isolation der Komponenten des TS, Schutz durch Rahmenstruktur als Potentialausgleich, Verletzung der Isolation durch scharfkantige Werkzeuge wahrscheinlicher	2	IMD; Sichtprüfung, vor allem nach durchgeführten Arbeiten am TS	30
Elektrischer Schlag durch das TS - Unfall des Fahrzeuges	5	schwere innere und äußere Verletzungen, Tod, zusätzlich Gefährdung Streckenposten	4	Schutz durch Isolation der Komponenten des TS, Schutz durch Rahmenstruktur als Potentialausgleich, hohe auftretende Kräfte bei einem Unfall ^a	2	Messung der Quertbeschleunigung über Crashesensor (<i>inertia switch</i>) im Fahrzeug und anschließende Abschaltung	40
Brandgefahr des Akkumulators ^b	5	schwere Verbrennungen und Tod, vollständige Zerstörung des Fahrzeuges	4	elektrische Überlastung und mechanische Beschädigung führen unmittelbar zur thermischen Zerstörung, trotz mechanischem Schutz durch Akkucontainer; elektrische Begrenzung durch VCU, exakte thermische Auslegung komplex und schwierig zu berechnen	1	Accumulator Management System (AMS) mit Zellüberwachung	20
Ungewolltes Beschleunigen bzw. Abbremsen des Fahrzeuges	4	Irritieren des Fahrers, Fahrzeug- und Personenschäden durch außer Kontrolle geratenes Fahrzeug, großzügige Auslaufzonen bei Einsatz an der Rennstrecke	3	Störspannung durch viele Komponenten möglich (hauptsächlich TS) \Rightarrow Stören der CAN-Übertragung des Antriebsstrangs, mechanische bzw. elektrische Störung <i>torque/brake encoder</i> ^c ; fehlerhafte Berechnung in der VCU; fehlerhafte Umsetzung durch Antrieb, aber durch mehrstufiges Sicherheitssystem abgesichert; Bremsmoment bei Kurzschluss der Maschine	2	entsprechende Konstruktion der Pedaleinheit (Kurzschluss und Leerlauferkennung), Zweisensorsystem, Absicherung der Kommunikation des Antriebes und Fehlererkennung im Antrieb bereits implementiert bzw. muss in der VCU implementiert werden	24
Ausfall des Bremssystems	5	Gefährdung eines großen Personenkreises mit schwerwiegenden Verletzungen und Tod, Stillstand des Fahrzeuges nicht kontrolliert	1	zweikreisiges mechanisches System, elektrische Bremsanlage um Fahrzeug notfalls zumindest zu verlangsamen	3	<i>Tilt Table Test</i> bei technischer Abnahme ^d , Druckverlust in einem Bremskreis bei Ausfall, Sicherheitssystem der Pedaleinheit für elektrische Bremsen	15
Beschädigung bzw. Zerstörung des mechanischen Antriebsstranges	4	kapitaler Schaden - Wettbewerbsausfall, hoher finanzieller Schaden, Verletzungen durch sich lösende Teile	4	Optimierung auf Masse und Baugröße, leistungsstarker und hochdynamischer Elektroantrieb, keine Erfahrung in der Konstruktion eines mechanisch Antriebsstranges für ein Elektrofahrzeug	5	Entdeckung erst bei Schadenseintritt	80
Ausfall der Kühlung	4	Zerstörung des Antriebssystems, Leistungsreduktion des Systems, Akkumulator nicht aktiv gekühlt, Verbürdungen des Fahrers oder umstehender Personen bei Beschädigung	3	Verbindungstechnik im Kühlbereich gut beherrschbar, starke Temperaturschwankungen bei Rennen, aus Massegründen knappe Dimensionierung der Kühlung	4	Temperatursensoren im Inverter, im Kühlsystem aus Massegründen bzw. um zusätzliche Verbindungsstellen zu vermeiden eventuell nicht vorhanden, schnelle Temperaturerhöhung im Antrieb bei Ausfall, keine Rückinformation des Pumpenstatus	48

Tabelle 3.3: Bewertung der Gefahren - Rennfahrzeug

^a Die Bewertung erfolgt für den Eintritt selbst. Bei Einrechnung der Wahrscheinlichkeit für einen Crash ist die gesamte Eintrittswahrscheinlichkeit deutlich geringer.

^b Die Brandgefahr des restlichen Antriebsstranges befindet sich, wie in Abschnitt 3.1.2 auf Seite 18 beschrieben, in den entsprechenden Abschnitten.

^c Das TS ist von der Pedaleinheit jedoch weit entfernt und die Pedaleinheit ist an mechanisch gut geschützter Stelle montiert.

^d Eine spätere Detektion durch Sichtprüfung im Falle des Austritts von Bremsflüssigkeit ist eventuell schwierig, da dies möglicherweise von der Verkleidung verdeckt wird.

Bezeichnung	Sev	Begründung Sev	Occ	Begründung Occ	Det	Begründung Det	risklevel
Zerstörung des mechanischen Antriebsstranges	5	Gefahr der Zerstörung der Antriebe durch hohe Systemdrehzahl und damit hohe Verletzungsgefahr	3	große Anzahl von Fehlerursachen, hohe Dynamik des Antriebes - kurzzeitiges Auftreten bei schnellen Lastwechseln wahrscheinlich	3	Drehzahlsensoren vorhanden, dynamische Vorgänge nicht immer schnell genug erkennbar	45
Ungewolltes Beschleunigen bzw. Abbremsen eines Antriebes	1	Teststand stationär, keine Personenschäden bzw. Schäden am Antriebssystem zu befürchten ^a	3	Störspannung durch viele Komponenten möglich (unter anderem TS) \Rightarrow Stören der CAN-Übertragung des Antriebsstrangs, mechanische bzw. elektrische Störung torque/brake encoder ^b , fehlerhafte Berechnung in der VCU; fehlerhafte Umsetzung durch Antrieb, aber durch mehrstufiges Sicherheitssystem abgesichert	2	entsprechende Konstruktion der Pedaleinheit (Kurzschluss und Leerlaufkennung), Zweisensorsystem, Absicherung der Kommunikation des Antriebes und Fehlererkennung im Antrieb bereits implementiert, kein detaillierter Einblick in Sicherheitssystem des Antriebes	6
Beschädigung bzw. unzulässige Änderungen durch Außenstehende	5	je nach Änderung schwere Schäden an den Antrieben und Personenschäden ^c	1	Teststand durchgehend mit einem Mitarbeiter besetzt, Belehrung der Studenten erfolgt im Vorfeld	2	Teststand ist generell beaufsichtigt, Studenten während der Praktikas unter Beaufsichtigung	10
Unabgesprochene Änderungen an der Anlage	2	wenig sicherheitsrelevante Änderungen am fertigen Teststand nötig; nur Parameteränderungen, die wenig Schaden anrichten können	2	Geringe Anzahl der Bediener, nahezu alle Bediener am selben Arbeitsplatz	2	Teststandbedienung durch kleinen Personenkreis, der eng miteinander zusammenarbeitet und Änderungen kommuniziert	8
Ausfall der Kühlung	4	Zerstörung des Antriebssystems, Leistungsreduktion des Systems	3	Verbindungstechnik im Kühlbereich gut beherrschbar, allerdings höhere Anzahl von Verbindungsstellen am Teststand; kaum Temperaturschwankungen am Standort, großzügige Dimensionierung der Kühlung, kein automatisches Aktivieren der Kühlung ^d	3	Temperatursensoren im Inverter und im Kühlsystem selbst, Temperaturerhöhung im Antrieb bei Ausfall sehr schnell, keine Rückinformation des Pumpenstatus	36

Tabelle 3.4: Bewertung der Gefahren - Teststand

^a Durch Beschädigung des mechanischen Antriebsstranges sind Personenschäden und Schäden am Teststand möglich. Diese werden jedoch im entsprechend benannten Gefahrenfall bewertet und finden hier deswegen keine Berücksichtigung.

^b Das TS ist von der Pedaleinheit jedoch weit entfernt.

^c Die Gefährdung hängt stark von der Art der Änderung der Personen ab. Die Einstufung entspricht dem ungünstigsten Fall.

^d Die Pumpen selbst verfügen über ein Notlaufsystem.

3.3 Maßnahmen zur Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung

Nach der Bewertung der einzelnen Gefahren müssen daraus Maßnahmen der Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung abgeleitet werden. Eine Verbesserung ist vor allem dann nötig, wenn für die jeweilige Gefahr ein hohes *risklevel* besteht, aber nicht ausschließlich.

3.3.1 Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Teststand und am Rennfahrzeug

Die Vermeidung von Gefahren am Rennfahrzeug basiert maßgeblich auf der Implementierung des Regelwerkes der SAE (Society of Automotive Engineers) International, den sogenannten *rules*. Diese werden so weit sinnvoll auch am Teststand implementiert, um etwaige Probleme frühzeitig aufdecken zu können.

Der Grad der schwerwiegenden Verletzungen, die bei Eintreten eines elektrischen Schlags am TS die Folge sein können, können nur schwer verhindert werden. Hier ist eine regelmäßige Schulung aller am Fahrzeug bzw. Teststand Beteiligten wichtig, um eine schnelle und korrekte Erste Hilfe gewährleisten zu können und Folgeschäden zu vermeiden. Ein schnelles Detektieren des Fehlers und Abschalten des TS senkt die Zeit der Durchströmung und verringert die Verletzungen, die die Person erleidet. Ein schnelles Abschalten bei Kurzschlüssen des TS bzw. GLVS durch die vorgelagerten Sicherungen wird durch den niederohmigen Potentialausgleich aller leitfähigen Teile erreicht, die sich im Abstand von 100 mm von Teilen des TS bzw. GLVS befinden. Dadurch wird ebenfalls die Berührungsspannung im Fehlerfall begrenzt. Das Regelwerk geht konkret in [13, EV4.3] auf diese Problematik ein. Auch Komponenten, die aus kunststoffüberzogenem Metall oder aus leitfähigen Kunststoffen wie Kohlenstofffasern bestehen, haben Grenzwerte bezüglich ihres Erdungswiderstandes. Neben der Verbesserung der Auftrittswahrscheinlichkeit durch die Anzeige eines aktiven TS mittels Tractive-System-Active Light (TSAL) am Rennfahrzeug und seiner Nachbildung am Teststand, ist eine gesonderte mehrfarbige Signalleuchte am Teststand zu empfehlen, die eine aktive Spannungsversorgung des Teststandes anzeigt. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme stellt der *shutdown circuit* dar, der im Regelwerk unter [13, EV5.1] beschrieben wird. Seine Bestandteile vermeiden bzw. vermindern nicht nur die Gefahr des elektrischen Schlages durch Abschalten des TS im Fehlerfall, sondern behandeln auch andere Gefahren, worauf in den entsprechenden Abschnitten eingegangen wird. Der *shutdown circuit* besteht aus den zwei Hauptschaltern Tractive-System-Master Switch (TSMS) und Grounded Low Voltage Master Switch (GLVMS), drei Notschaltern im und am Fahrzeug, dem *brake over travel switch*, dem IMD, dem *inertia switch*, dem Brake System Plausibility Device (BSPD), dem AMS und den nötigen Verriegelungen der Komponenten untereinander.

Diese schalten das TS über die AIRs ab. In Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite erfolgt eine Darstellung der Verdrahtung des *shutdown circuit* mit weiteren Komponenten. Zu beachten ist, dass das GLVS ebenfalls mit einer Sicherung abgesichert werden muss, was in dieser Abbildung allerdings nicht dargestellt wird. Die AIRs werden zusätzlich durch Vorladeschütze unterstützt, die den Ladestrom der Zwischenkreiskapazität des Inverters begrenzen. Nach Abschalten des TS muss die Spannung des Zwischenkreises innerhalb von 5s auf unter 60V DC bzw. 25V AC abgesunken sein [13, EV5.1.3], was eine Entladeschaltung erfordert¹⁵. Um die Funktionsfähigkeit des *shutdown circuit* auch bei Ausfall einzelner Komponenten zu erhalten, sollten die Spulen der AIRs direkt angesteuert werden und die Auslegung drahtbruchsicher erfolgen. Das Regelwerk schreibt weiterhin vor, dass sich das TS bei Auslösen des AMS, des IMD oder des BSPD nach der Fehlerbeseitigung nicht von selbst aktivieren darf und manuell zurückgestellt werden muss¹⁶. Am Teststand sollten diese Sicherheitselemente nach Möglichkeit direkt als Komponente nachgebildet werden. Die Auftrittswahrscheinlichkeit eines elektrischen Schlages kann durch mehrere Maßnahmen weiter verbessert werden. Das gesamte TS ist vollständig von allen Komponenten zu isolieren. Im Regelwerk wird die Schutzart IP65 empfohlen, die Einhaltung einer adäquaten Isolierung wird mit dem sogenannten *raintest* überprüft [13, EV4.5.3]. Der Inverter und die Maschine, mitsamt der Verbindungskabel und Steckverbinder wurden zugekauft und sind dementsprechend wie vorgeschrieben isoliert. Besonderes Augenmerk muss daher auf die Isolierung des Akkumulatorpacks gelegt werden, da dieser selbst konfektioniert und entworfen wird. Um die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu erhöhen, schreibt das Regelwerk ein IMD vor. Dieses erkennt Einzelfehler und schaltet über den *shutdown circuit* das System ab. Laut [13, EV8.3.7] muss diese auch beim Laden aktiv sein. Eine Installation erfolgt also entweder am Akkumulator oder das Ladegerät muss selbst ein IMD besitzen.

Tritt ein Lichtbogen am Fahrzeug auf, ist das Schadensausmaß im Rahmen eines Fahrzeuges, was in einem Rennen eingesetzt wird, schwierig zu senken. Eine Möglichkeit ist die vorgeschriebene *firewall*. Weiterhin löst ein Kurzschluss im TS die nach [13, EV3.3.2] vorgeschriebene Sicherung des Akkupacks aus, was einen Lichtbogen im TS bei ausreichender Kurzschlussfestigkeit der Sicherung in der vorgeschriebenen Zeit unterbricht. Der Lichtbogen brennt jedoch mindestens so lang, wie die im Zwischenkreis gespeicherte Energie in Wärme umgewandelt wurde. Am Teststand könnten die Folgen eines Lichtbogens für Personen stark vermindert werden, indem der Teststand in einem abgetrennten Raum betrieben wird. Solange kein solcher Raum zur Verfügung steht, ist auch am Teststand eine Senkung des Schadensausmaßes nur über eine Abschirmung ähnlich einer *firewall* und der Sicherung der Gleichspannungsquelle möglich. Messungen mit externen Messgeräten werden durch eine *firewall* allerdings erschwert. Die Eintrittswahrscheinlichkeit kann dagegen mit vergleichsweise wenig Aufwand noch

¹⁵ Der Inverter verfügt über eine interne Entladefunktion. Wenn möglich, erfolgt dies aktiv über das GLVS. Ist dies aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich, erfolgt das Entladen über Entladewiderstände, was ca. 120s erfordert. Da ein aktives Entladen nicht garantiert werden kann, kann auf eine externe Entladeschaltung nicht verzichtet werden.

¹⁶ Der Fahrer darf nicht im Stande sein, das System vom Cockpit aus zurückzusetzen.

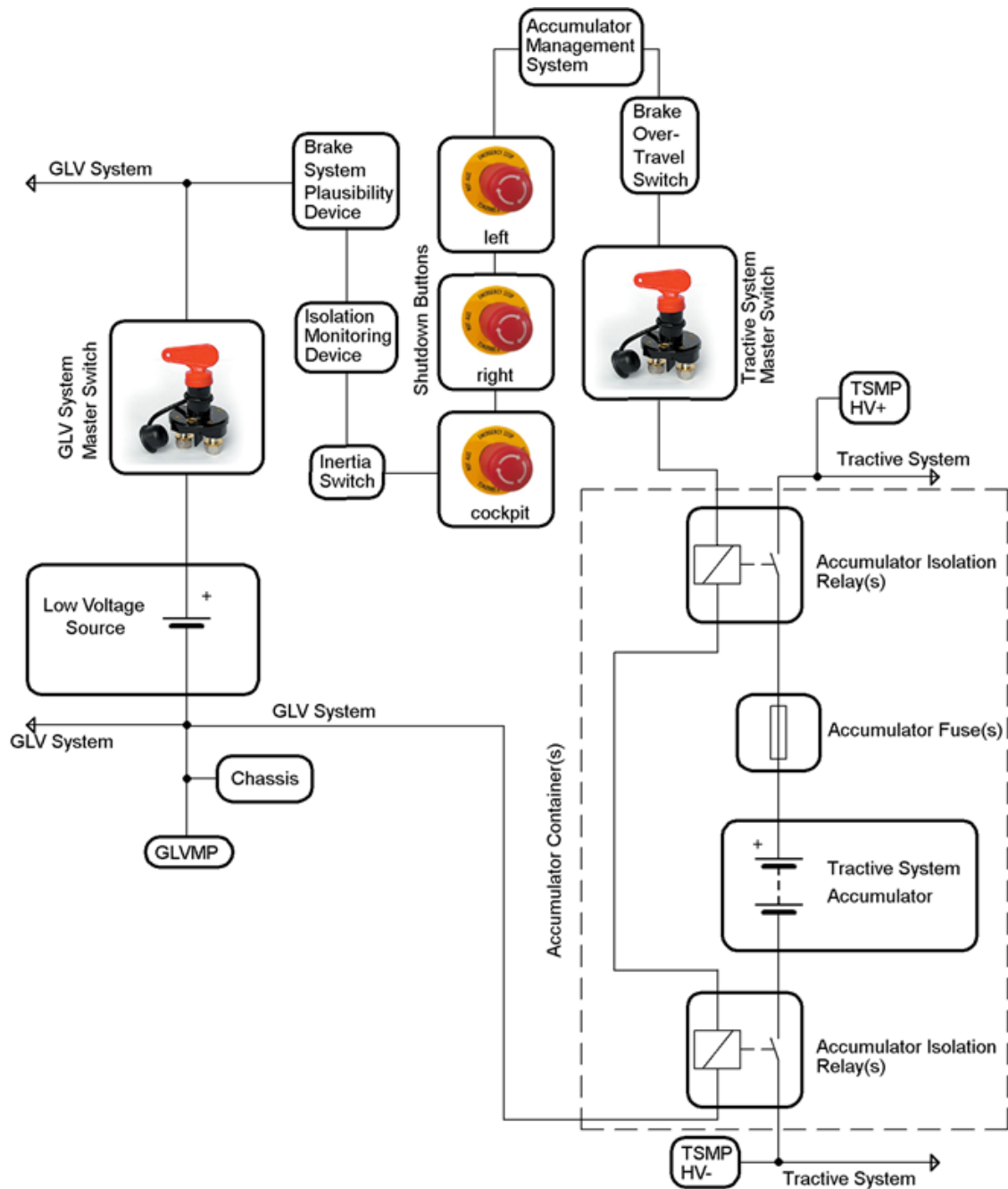


Abbildung 3.1: Empfohlene Verdrahtung der Schutzeinrichtungen im Fahrzeug - *shutdown circuit* [13, 118]

weiter gesenkt werden. Im Fahrzeug muss laut [13, EV4.1], bis auf wenige Ausnahmen, das TS vom GLVS und damit von der Fahrzeugmasse separiert werden. Dadurch entsteht bei einem einfachen Erdfehler des TS kein Lichtbogen. Ist dies nicht möglich bzw. aufgrund der Funktionsweise der Komponente unsinnig, muss eine wasserdampfundurchlässige Isolierung eingesetzt bzw. ein Abstand von 30mm¹⁷ zwischen TS und GLVS eingehalten werden. Am Teststand wird diese Trennung ebenfalls durchgeführt. Alle Schaltschränke und Klemmkästen, außer der Hauptverteilung, werden nur für das TS verwendet. Die größte Auftrittswahrscheinlichkeit für Lichtbögen besteht jedoch beim Lösen von Steckkontakten des TS. Durch die im Reglement vorgeschriebene High Voltage Interlock Line (HVIL) erfolgt eine Abschaltung der AIRs und damit des TS, sobald ein Kontakt getrennt wird¹⁸. Diese ist im Antrieb bereits vorgesehen und sichert die DC/AC-Steckverbindungen des TS und die Abdeckungen des TS ab [12, Seite 40]. Es erfolgt jedoch weder eine Überwachung noch eine Spannungsversorgung dieser HVIL. Die Versorgung und Auswertung muss extern erfolgen, die Einbindung des Inverters und der HV-Schnittstellen in dieses Konzept wird dadurch allerdings stark vereinfacht¹⁹. Im Fahrzeug wäre aufgrund der Abschaltung über die AIRs und der nötigen Überwachung der Verbindung zwischen Ladegerät und Akkumulator eine Auswertung im Akkumulator selbst günstig. Am Teststand kann dies frei gewählt werden, da der Zugang zur Gleichspannungsquelle grundsätzlich mit einer Abschaltung der gesamten Stromversorgung des Labors verbunden ist. Bei Unterbrechung dieser HVIL muss die VCU bei Registrierung gleichzeitig das Entladen des Zwischenkreises veranlassen. Eine Verbesserung der Entdeckungswahrscheinlichkeit ist mit der vorhandenen Messtechnik und aufgrund der hohen Komplexität im Rahmen der begrenzten Entwicklungszeit des Rennfahrzeuges nicht möglich. Durch die, aufgrund der aufgeführten Maßnahmen, geringe Auftrittswahrscheinlichkeit ist dies jedoch vertretbar. Das Auftreten eines Lichtbogens im GLVS kann trotz der im Vergleich zum TS geringeren Energiemenge Personenschäden verursachen. Eine Verminderung der Schadensschwere durch die Abtrennung der Komponenten ähnlich der *firewall* des TS ist aufgrund ihrer großen Zahl und Verteilung im gesamten Fahrzeug schwierig. Die korrekte Absicherung der einzelnen Komponenten bzw. ihrer Stromkreise bietet einen gewissen Schutz aufgrund der bereits genannten Begrenzung der möglichen Energiemenge. Die Auftrittswahrscheinlichkeit ist schwierig abzusenken. Hier muss durch eine konsequente Schulung der Teammitglieder das Bewusstsein geschaffen werden, dass eine Gefährdung trotz der niedrigen Gleichspannung von 12V besteht. Vor allem bei starken Verbrauchern des GLVS, wie der Kühlungspumpe, muss sich die an dieser Komponente arbeitende Person der Gefahr bewusst sein. Eine Detektion eines Lichtbogens im Bereich des GLVS ist aufgrund der vielen Komponenten ebenfalls schwierig.

¹⁷ Dies gilt für eine Nennspannung des TS von über 200V DC.

¹⁸ Durch die werkzeuglos mögliche Trennung der Verbindung zwischen Inverter und Maschine ist dies notwendig.

¹⁹ Der Zugang zur HVIL des Inverters sollte über das Auftrennen der Steuerverbindung zwischen Inverter und der Maschine erfolgen, so wie es auch von Bosch vorgesehen ist [12, Seite 90]. In der 28-poligen Verbindung zwischen Inverter und Maschine sind dafür Pin 25 (HVIL-OUT) und Pin 28 (HVIL-IN) vorgesehen.

Das Schadensausmaß bei Verpolung des TS kann aufgrund der hohen Ströme und Spannungen nicht ohne hohen Aufwand vermindert werden. Bei Komponenten des GLVS sind Schutzbeschaltungen denkbar, die das Gerät vor Zerstörung schützen. Ein Auftreten dieses Fehlers kann im TS und im GLVS wirksam durch entsprechend konstruierte Steckverbinder verhindert werden. Durch die besondere Konstruktion solcher Verbinder ist ein versehentliches Vertauschen nicht mehr möglich. Ein Erhöhen der Entdeckungswahrscheinlichkeit dieses Fehlers im GLVS ist nur in Zusammenhang mit einer Schutzbeschaltung an jeder Komponente denkbar. Durch die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit und die hohe Anzahl der Komponenten erscheint der Aufwand dafür aber zu hoch. Für das TS wird laut Technischer Kundenunterlage (TKU) des Antriebes eine Erkennung durch die VCU während des Vorladevorganges zusammen mit einer Begrenzung des Ladestromes auf 35 A [12, Seite 37] empfohlen. Bei Detektion einer falsch gepolten Spannung muss der Vorladevorgang abgebrochen und eine Meldung ausgegeben werden. Eine sehr schnelle Detektion kann dann das Schadensausmaß vermindern bzw. verhindern, wobei eine Auslösezeit, innerhalb der kein Schaden am Antrieb entsteht, leider nicht angegeben wird.

Nach [13, EV1.2.10] muss das TS deaktiviert werden, sobald das GLVS nicht mehr zur Verfügung steht. In Abbildung 3.1 auf Seite 28 ist zu sehen, dass dies im Rennfahrzeug über die Spannungsversorgung des *shutdown circuit* direkt über das GLVS verhindert wird. Am Teststand erfolgt die Freigabe des TS ebenfalls über das GLVS, sodass dieser Fehler dort ebenfalls nicht mehr auftreten kann. Zusätzlich ist ein Batteriewächter installiert, der die Spannung des GLVS überwacht und den Anwender informiert bzw. die Freigabe des TS verweigert.

Eine Behandlung der Gefahr des ungewollten Beschleunigens bzw. Abbremsens des/eines Antriebes und des Ausfalls der Kühlung erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Gegenmaßnahmen am Teststand und am Rennfahrzeug in Abschnitt 3.3.2 bzw. in Abschnitt 3.3.3 auf Seite 34.

3.3.2 Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Rennfahrzeug

Die Sicherheitssysteme am Fahrzeug sind in ihrer Gesamtheit sehr komplex. Aus diesem und anderen Gründen ist im Regelwerk [13, A5.3] ein Electrical System Advisor (ESA) vorgeschrieben. Dieser berät das Team in Fragen der Integration der elektrischen Komponenten und Steuerungssysteme, zu denen die Sicherheitssysteme gehören. Er berät das Team ebenfalls beim Design der Komponenten und hat so großen Einfluss auf die Umsetzung der Maßnahmen zur Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung. Er ist schlussendlich für die Prüfung der Electrical System Form (ESF) ²⁰ und FMEA ²¹ zuständig.

²⁰ Das ESF stellt unter anderem eine detaillierte Beschreibung der implementierten Sicherheitssysteme dar.

²¹ Die FMEA analysiert und bewertet Fehler, die an den Komponenten des Fahrzeuges auftreten können.

Die Gefahr des elektrischen Schlages unterliegt einigen Besonderheiten am Teststand. So müssen Maßnahmen ergriffen werden, die die höhere Auftrittswahrscheinlichkeit am Rennfahrzeug abmildern. Im Regelwerk [13, A5.2] ist ein Electrical System Officer (ESO) vorgeschrieben. Er ist verantwortlich für den elektrischen Betrieb des Fahrzeuges sowie für alle Arbeiten am Fahrzeug auf den Rennevents zuständig. Erst wenn er das Fahrzeug für elektrisch sicher erklärt hat, dürfen die Teammitglieder am Auto arbeiten. Eine Arbeitserlaubnis darf nur erteilt werden, wenn das TS und das GLVS über die Hauptschalter TSMS und GLVMS abgeschaltet und der Akkumulator aus dem Fahrzeug entfernt wurde. So wird nach Entladen des TS, der Messung der Spannungsfreiheit und der Freigabe durch den ESO die Gefahr des elektrischen Schlages bei Wartungsarbeiten wirksam verhindert. Vor allem im Hinblick auf die Tatsache, dass auch Personen am Fahrzeug arbeiten, die nur elektrisch unterwiesene Personen sind, erscheint dies sinnvoll. Weiterhin ist nach [13, EV8.1.3/4] vorgeschrieben, dass Arbeiten am TS und am Akkumulator nur mit isoliertem Werkzeug durchgeführt werden und bei offenem TS und am Akkumulator eine Schutzbrille getragen werden muss. Für das Schadensausmaß und die Entdeckungswahrscheinlichkeit gelten die im Abschnitt 3.3.1 auf Seite 26 getroffenen Maßnahmen zur generellen Gefahr des elektrischen Schlages.

Tritt ein Unfall ein erfolgt ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Auftrittswahrscheinlichkeit eines elektrischen Schlages. Dies muss unter anderem auch durch konstruktive Maßnahmen abgefangen werden. Laut [13, EV4.2] müssen die Komponenten des TS durch den Rahmen geschützt werden, auch im Falle eines Überschlages. In [13, AF4.8] sind die Belastungen, die der Sicherheitscontainer des Akkumulators aushalten muss, vorgeschrieben. Dabei gelten erhöhte Anforderungen, sollte der Akkumulator nicht durch eine Chassisstruktur vom Fahrer abgetrennt sein. Aber auch Komponenten wie die AIRs müssen bei einem Unfall eine hohe Querschleunigung aushalten und noch sicher trennen können. Der *inertia switch* detektiert einen Unfall und schaltet im Ernstfall über den *shutdown circuit* und damit über die AIRs das TS ab. Löst der *inertia switch* bei kleineren Unfällen nicht aus, werden die *master switches* (TSMS, GLVMS) verwendet um das System manuell abzuschalten. Für Notfälle ist laut [13, EV4.7] ein High Voltage Disconnect (HVD) vorgeschrieben. Dieser schafft eine Trennstelle eines Poles im TS, die auch von ungeübten Personen bedient werden kann. Nach Öffnen dieses HVD muss eine Verriegelung mit dem *shutdown circuit* die AIRs öffnen, sollten diese noch funktionsfähig sein ²². Diese Maßnahmen sorgen dafür, dass für Retter bei einem Unfall keine Gefahr eines elektrischen Schlages besteht.

Das Schadensausmaß eines Akkumulatorbrandes wird durch die in [13, T4.5.1] vorgeschriebene und in Abschnitt 3.3.1 auf Seite 26 bereits erwähnte *firewall* abgemildert, solange der Akkumulator wie geplant hinter dem Fahrer angeordnet wird. Diese trennt neben dem Akkumulator auch das Kühlsystem und das TS vom Fahrer ab und hat damit noch weitere Schutzfunktionen. Um die Auftrittswahrscheinlichkeit weiter zu sen-

²² Dabei ist zu beachten, dass der HVD die Entladeschaltung nicht abtrennt.

ken, erfolgt über die bereitgestellten Daten des AMS ²³ bei beispielsweise zu hohem Temperaturanstieg eine Reduktion der Last durch die VCU. Sind Arbeiten im bzw. am Akkumulator nötig, dürfen diese nur in der sogenannten *charging area*, in welcher besondere Sicherheitsmaßnahmen gelten, durchgeführt werden. Während des Ladevorganges wird der Akkumulator durch das AMS weiterhin überwacht und es muss immer eine eingewiesene Person beim Akkumulator anwesend sein, um im Fehlerfall schnell Maßnahmen zur Verminderung des Schadens ergreifen zu können. Es sind über das AMS hinaus keine weitere Verbesserungen der Entdeckungswahrscheinlichkeit nötig.

Um das Schadensausmaß der Gefahr des ungewollten Beschleunigen des Antriebes am Fahrzeug zu senken, sind in [13, EV4.12/13] mehrere Warneinrichtungen vorgeschrieben, die den Nutzer darüber informieren, dass das Fahrzeug fahrbereit ist. Dies ist bei einem Elektrofahrzeug besonders wichtig, da der Antrieb äußert schnell auf Drehmomentanforderungen reagiert und seine Lautstärke sehr gering ist. Das direkt mit dem TS verbundene TSAL zeigt an, dass das TS aktiv ist und damit prinzipiell eine Gefahr vom Fahrzeug ausgeht, wogegen der Ready-To-Drive-Sound erkennen lässt, dass der Antrieb auf ein vorgegebenes Sollmoment reagiert. Neben diesen Signalen sollte eine Warnlampe anzeigen, dass die Pedaleinheit gestört ist, was Fehlreaktionen des Fahrers vorbeugt. Eine Schulung des Fahrers über die Reaktion des Systems bei einem Kurzschluss der Maschine und einem Ausfall der elektrischen Bremse dient ebenfalls diesem Zweck. Das Schadensausmaß wird weiterhin durch die vorgeschriebenen *shutdown buttons* gesenkt. Im Notfall kann man darüber das TS abschalten und so schlimmeres verhindern. Die Auftritts- und die Entdeckungswahrscheinlichkeit muss über die Überwachung der gesamten Kette von Komponenten, die an der Bereitstellung des Drehmomentes beteiligt sind, verbessert werden. Dies beginnt mit der Prüfung der *torque* bzw. *brake encoder*. In [13, EV2.3/4] wird neben dem Aufbau der Pedaleinheit auch die Prüfung auf Kurzschluss und Drahtbruch dieser Sensoren, wie auch die maximale Abweichung zwischen den beiden vorgeschriebenen *torque encoder* beschrieben. Das Regelwerk schreibt keine zwei *brake encoder* vor. Zur Fehlererkennung sollten aber trotzdem zwei Sensoren verwendet werden. Eine Beschreibung des im Rennfahrzeug genutzten Auswertalgorithmus der Sensoren der Pedaleinheit erfolgt in Abschnitt 5.4.2.3 auf Seite 75. Die Absicherung des von der VCU berechneten Sollmomentes könnte redundant in Form eines Vergleiches mit einer Berechnung auf einem zweiten Steuersystem erfolgen. Dies ist allerdings aufwendig, weswegen die Sicherungsmechanismen der VCU selbst ausreichen müssen. Das Regelwerk schreibt allerdings ein BSPD vor, das die AIRs abschaltet, sobald bei starkem Abbremsen eine elektrische Leistung von 5 kW im Motorbetrieb vom Antrieb abgegeben wird. Der Antrieb selbst hat ein internes Sicherungssystem gegen die Bereitstellung von nicht angefordertem Moment, welches in [12, Seite 36] beschrieben wird. Dabei werden aber teilweise nicht zugängliche interne Dokumente des Herstellers des Antriebssystems referenziert. Schlussendlich werden wichtige Nachrichten zwischen Inverter und Maschine über eine Überprüfung von

²³ Neben dem Messen der Spannung und der Temperatur erfolgt durch das AMS eine Kurzschlussüberwachung der Zellen.

Checksummen und einem Messagecounter abgesichert. Dies sollte auf die gesamte Kommunikation zwischen den eben genannten Komponenten ausgeweitet werden. Bei Störung der Kommunikation bis hin zum Totalausfall muss der Antrieb abgeschaltet werden.

Im Fehlerfall wird die Maschine oberhalb einer Maximaldrehzahl durch den Inverter kurzgeschlossen. Da die Maschine permanenterregt ist, führt dies zu einem Bremsmoment. Dieses kann nur durch eine mechanische Trenneinrichtung verhindert werden.

Das Schadensausmaß eines Ausfalls des Bremssystems ist maßgeblich von der Situation und der Umgebung, in der der Fehler auftritt, gekennzeichnet. Durch den Einsatz auf einem Rennevent können diese nicht selbst beeinflusst werden²⁴. Die Auftrittswahrscheinlichkeit ist durch das verwendete zweikreisige System der mechanischen Bremse und das zusätzliche elektrische Bremssystem bereits sehr niedrig. Die rein elektrische Übertragung des Bremspedalsignals wird durch [13, T7.1.4] verboten, weshalb eine mechanische Verbindung vorhanden sein muss. Das Fahrzeug muss bei einer Vollbremsung mit abgeschalteter Elektronik alle vier Räder blockieren können und nur die ersten 90% des Pedalweges dürfen rein elektrisch gebremst werden. In [13, T7.1.6] ist weiterhin eine Abschirmung des Bremssystems vom mechanischen Antriebsstrang vorgeschrieben, wodurch die Gefahr der Beschädigung bei dessen Zerstörung verringert werden soll. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit wird durch den im Regelwerk unter [13, T7.3] beschriebenen *Brake Over Travel Switch* weiter verbessert. Dieser detektiert eine mechanische Zerstörung des Bremspedals und schaltet über die AIRs das TS ab.

Am Rennfahrzeug muss nach [13, T8.4.1] eine Verringerung des Schadensausmaßes für Personen bei Zerstörung des mechanischen Antriebsstranges durch eine schützende Abschirmung von Komponenten, wie der Maschine und der Kraftübertragung durch Differentiale, Ketten, Riemen oder Getriebe erfolgen. Das Regelwerk schreibt ebenfalls die Wandstärke dieser Abschirmungen vor. Die Auftrittswahrscheinlichkeit kann durch entsprechende Sollwertvorgabe der VCU an den Antrieb deutlich gesenkt werden. Der Antriebsstrang kann beispielsweise durch die Begrenzung des Anstieges und ein nicht abruptes Abregeln des Sollmomentes im Fehlerfall geschont werden. Aufgrund der zeitlich sehr schnellen Vorgänge ist eine Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit nicht ohne großen Aufwand möglich und wird deswegen nicht realisiert.

Das Schadensausmaß bei Ausfall der Kühlung ist schwierig zu senken. Ein Personenschaden durch Kühlmittelaustritt wird durch die bereits angesprochene *firewall* vermindert. Eine Verminderung des Schadens am Rennfahrzeug ist nur bei frühzeitiger Erkennung des Fehlers durch sofortiges Abschalten der Antriebe möglich. Dies geht direkt mit der Verbesserung der Entdeckungswahrscheinlichkeit einher. Eine Rückmeldung des Status der Kühlmittelpumpe und eine Überwachung des Druckes im Kühlsystem ist hier denkbar. Die Auftrittswahrscheinlichkeit könnte durch eine Redundanz des Kühlsystems

²⁴ Als Beispiel sind hier die Auslaufzonen der Rennstrecke zu nennen.

verbessert werden, aufgrund der Vergrößerung der Fahrzeugmasse ist dies jedoch ausgeschlossen. Am Rennfahrzeug erfolgt dagegen eine Optimierung des Kühlsystems auf wenige Verbindungsstellen und kurze Entfernungen.

3.3.3 Gefahrenvermeidung bzw. -reduzierung am Teststand

Auch wenn eine Nutzung des Antriebteststandes nur durch unterwiesene Personen gestattet ist, muss eine Betriebsanweisung am Teststand aushängen, die neben allgemeinen Sicherheits- und Betriebshinweisen auch auf technische Besonderheiten eingeht.

Die Gefahr, dass der Antriebteststand mechanisch zerstört wird, zeichnet sich durch ein hohes Schadensausmaß aus. Dem kann man durch mechanische Schutzmaßnahmen entgegenwirken. Die Maschinen sind in der Lage ein sehr hohes Drehmoment innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde einzuregeln. Aufgrund des Testaufbaues kann es sehr schnell zu hohen dynamischen Belastungen im Antriebsstrang und der Maschinen selbst kommen. Neben den Teilen des Antriebes, die offen zugänglich sind, ist somit auch eine Abschirmung der Maschinen selbst nötig. Die schon im Abschnitt 3.3.1 auf Seite 26 vorgeschlagene Platzierung des Teststandes in einem extra dafür vorgesehenen Raum würde das Ausmaß von Personenschäden effektiv verringern. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ist dies jedoch nicht durchführbar. Solange ein abgetrennter Raum nicht zur Verfügung steht, werden softwareseitige Maßnahmen in Form einer Begrenzung des Maximalmomentes und der Maximaldrehzahl ergriffen. Diese verringern die Schadensschwere, senken aber vor allem die Wahrscheinlichkeit des Auftretens signifikant. Die Firmware des Inverters selbst besitzt bereits mehrstufige Schutzmechanismen. Eine Überschreitung von Grenzwerten bestimmter Parameter²⁵ bewirkt beispielsweise eine lineare Reduzierung der abgegebenen Leistung der Antriebe. Allerdings ist die Software der Inverter auf einen Betrieb am Fahrzeug ausgelegt. Durch die Software des Teststandes wird das maximal verfügbare Drehmoment der Maschinen am Teststand begrenzt. Ab einer bestimmten Drehzahl, die weit unter der theoretisch möglichen Drehzahl der Antriebe liegt, werden die Antriebe abgeschaltet. Eine schnelle Regelung der Belastungsmaschine mit nur geringem Überspringen verringert die dynamischen Belastungen des Antriebsstranges ebenso wie die Begrenzung des Sollwertanstieges über eine Drehmomentrampe. Die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen alleinigen Betrieb der Antriebsmaschine wird gesenkt, indem die Belastungsmaschine durch die Teststandsoftware aktiviert wird, ohne dass der Nutzer diese deaktivieren kann. Weiterhin muss der Status der Maschinen überwacht werden. Wird eine Maschine in den Status *failure* oder *discharge* versetzt, muss die andere Maschine ebenfalls kontrolliert heruntergefahren werden. Wird der Teststand deaktiviert, sind beide Maschinen zeitgleich abzuschalten. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit kann durch externe Sen-

²⁵ Dazu gehören Drehzahl, die Zwischenkreisspannung und die Temperatur der Maschine, des Inverters und des Kühlmittels.

sorik und einer unabhängigen Auswerteelektronik erfolgen.

Die Gefahr, dass ein Antrieb vom Nutzer ungewollt im Rahmen seines Arbeitsbereiches beschleunigt bzw. abbremst, führt am Teststand in Bezug auf Personenschäden zu einer geringen Schadensschwere. Das Risiko von fehlerhafter Übertragung der Sollwerte der Pedaleinheit durch Störspannungen ist durch den größeren Abstand vom TS generell geringer. Um die Auftrittswahrscheinlichkeit weiter zu senken, werden dieselben Algorithmen wie im Rennfahrzeug verwendet, weshalb ein Test vor dem Einsatz im Fahrzeug erfolgen kann.

Bei Beschädigungen bzw. unzulässigen Änderungen durch Außenstehende fällt zuerst die hohe Schadensschwere auf. Diese ist aufgrund der Vielzahl der möglichen Änderungen schwierig einzuschätzen bzw. einzugrenzen und genauso schwer zu verringern. Beispielsweise kann eine unbefugte Manipulation am TS schwere Schäden hervorrufen. Eine Verringerung der Schadensschwere ist hier aber durch ein schnelles Ansprechen der Isolationsüberwachung und das Abschalten bei einem Erstfehler gewährleistet. Die Schadensschwere kann noch weiter verringert werden, indem der Teststand nur aktiviert wird, wenn keine Studenten im Labor anwesend sind ²⁶. Sämtliche Schaltschränke, die spannungsführende Teile enthalten, können nur mithilfe eines Schaltschrankschlüssels geöffnet werden, sodass Außenstehende keinen Zugang haben. Weiterhin ist verstärkt auf Ordnung auch während Umbauarbeiten zu achten, womit Stolperfallen vermieden werden. Die hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit kann nur durch erhöhte Aufmerksamkeit während studentischer Praktika verbessert werden.

Die Schadensschwere von unabgesprochenen Änderungen am Teststand ist eher gering, kann jedoch trotzdem noch verbessert werden. So können bestimmte sicherheitsrelevante Teile der Software nur den Personen zugänglich gemacht werden, die für die Sicherheit des Teststandes verantwortlich sind. Dadurch können die restlichen Nutzer nur noch Parameter ändern und keine essentiellen Sicherheitsfunktionen deaktivieren. Weiterhin kann der Zugriff auf diese Parameter durch Wertegrenzen beschränkt werden, wodurch auch eine starke Veränderung beispielsweise des virtuellen Trägheitsmomentes keine Schäden am Antrieb hervorrufen kann. Die Auftrittswahrscheinlichkeit kann gesenkt werden, indem ein Warnhinweis am Teststand hinterlegt wird, falls für spezielle Tests doch einmal ein Deaktivieren bestimmter Sicherheitsfunktionen nötig ist bzw. sollte ein Abschränken erfolgen. Falls ein nach Abschluss der Tests nötiges Aktivieren dieser Funktionen vergessen wird, werden nachfolgende Nutzer dadurch zumindest darauf hingewiesen. Die Schadensschwere wird in diesen seltenen Fällen zwar verschlechtert, aber zumindest wird die Entdeckungswahrscheinlichkeit verbessert. Die Auftrittswahrscheinlichkeit kann durch eine klare Rangordnung unter den Bedienern des Teststandes verbessert werden. Dies setzt voraus, dass ein Sicherheitsverantwortlicher bestimmt wird, ähnlich dem bei Rennen der Formula Student einzusetzenden ESO. Nur

²⁶ Es sind trotzdem Studenten anwesend, diese arbeiten jedoch an verschiedenen Projekten innerhalb der Forschungsgruppe und sind demzufolge keine Außenstehenden.

dieser darf sicherheitsrelevante Teile der Software modifizieren und mechanische sowie elektrische Arbeiten am Teststand koordinieren bzw. überwachen. Er unterweist auch alle anderen Personen am Teststand und macht dies aktenkundig. Die ermittelte Entdeckungswahrscheinlichkeit ist hoch und es werden keine Maßnahmen zur weiteren Verbesserung empfohlen.

Die Schadensschwere bei einem Ausfall der Kühlung kann nur schwer verringert werden. Eventuell ist eine Konstruktion der Kühlung möglich, die durch natürliche Konvektion eine ausreichende Wärmeabfuhr der Antriebe gewährleistet, bis eine Detektion und Abschaltung erfolgt, ohne dass die Antriebe beschädigt werden. Dieser Lösungsansatz wird jedoch als sehr aufwendig und schwer umsetzbar angesehen. Vielmehr ist eine niedrigere Auftrittswahrscheinlichkeit anzustreben. Eine Automatisierung mit einer Verriegelung der Antriebe, solange die Kühlung inaktiv ist, und einer Rückmeldung des Zustandes des Gesamtsystems würde Fehlbedienungen verhindern. Es sollten alle Bediener des Teststandes bis dahin eine ausführliche Einweisung über diesen Sachverhalt erhalten. Eine regelmäßige optische Prüfung der Verbindungsstellen auf Risse oder defekte Verbindungsmittel senkt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Kühlung bei laufenden Maschinen ebenfalls. Am Teststand ist, wie bereits in Abschnitt 3.1.3 auf Seite 20 erwähnt wurde, eine großzügige Dimensionierung der Komponenten möglich. Ein Ausfall aufgrund der Überlastung einzelner Bauteile ist damit schon grundsätzlich als gering einzuschätzen. Ein Verzicht auf zusätzliche Sensoren und damit auf Verbindungsstellen im Kühlsystem wird als nicht sinnvoll angesehen, da dies die Möglichkeiten des Teststandes stark einschränkt, zumal diese die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Ausfalls erhöhen. Durch die Rückmeldung des Status der Pumpen ist eine weitere Verbesserung möglich. Auch die Kontrolle des Ausgleichsbehälters mithilfe eines Sensors, um kleinere Verluste an Kühlmittel zu erkennen und die bereits angesprochene regelmäßige optische Prüfung der Verbindungsstellen erhöht diese. Im Kühlsystem selbst könnten Drucksensoren für diesen Zweck installiert werden.

4 Technische Ausgangssituation und nötige Erweiterungen

4.1 Ausgangssituation des Teststandes

Der für die Arbeit genutzte Teststand besteht aus zwei baugleichen mechanisch direkt gekuppelten permanenterregten Synchronmaschinen. Diese werden über jeweils einen Inverter angesteuert und über einen gemeinsamen Zwischenkreis durch eine Gleichspannungsquelle versorgt. Die Antriebe, ihre Kühlung und der gemeinsame Zwischenkreis sind gemeinsam auf einem Maschinenbett montiert. Eine Maschine dient als Antriebsmaschine und wird später im Rennfahrzeug verbaut. Die zweite Maschine dient als Belastungsmaschine und dient zur Simulation einer mechanischen Trägheit, wie sie am Rennfahrzeug auftritt. Eine detaillierte Beschreibung des mechanischen Aufbaus und der Energieversorgung des gesamten Teststandes würde den Rahmen der Arbeit überschreiten und ist für das Verständnis der Arbeit auch nicht nötig. Bei weitergehendem Interesse sei daher auf die Projektarbeit „Planung der Energieversorgung eines Antriebteststandes für ein Elektrorennfahrzeug“ des Autors verwiesen [10].

Am Teststand und im Rennfahrzeug erfolgt die Kommunikation über ein im Fahrzeugbau verbreitetes Bussystem, dem Controller Area Network (CAN). Beide Maschinen werden über jeweils einen CAN-Kanal angesteuert. Dies erfolgt mit einem VECTOR VN1630 CAN-Adapter, welcher das Ansteuern beider Antriebe über einen Laptop ermöglicht. Zu Beginn der Arbeit ist die Kommunikation mit den Invertern funktionsfähig. Allerdings kann den Antrieben nur manuell ein Sollmoment vorgegeben werden. Ein geregelter bzw. koordinierter Betrieb ist noch nicht möglich bzw. ist dies Inhalt dieser Arbeit.

4.2 Erweiterungen im Rahmen der Arbeit

4.2.1 Elektrischer Aufbau des Teststandes

Zu Beginn der Arbeit erfolgte der Aufbau des GLVS des Teststandes. Dieses stellt die Spannungsversorgung für folgende Baugruppen dar:

- *shutdown circuit*
 - IMD
 - Abschaltmöglichkeit PC
 - Unterspannungsschutz

- VCU mit Anbindung I/O
- Inverter der Antriebe
- Kühlsystem
- Benutzerschnittstelle
 - Bedienpanel
 - Pedaleinheit

Es erfolgt eine vollständige Trennung von TS und GLVS am Teststand. Nur Komponenten, wo dies funktional notwendig ist, bilden eine Ausnahme. Dies betrifft die Antriebe und das IMD.

Eine vollständige Nachbildung des in Abbildung 3.1 auf Seite 28 dargestellten *shutdown circuit* ist nicht möglich und auch nicht notwendig, orientiert sich aber daran. In Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite ist die Implementierung am Teststand dargestellt. Die Ansteuerung der als AIRs genutzten Gleichstromschütze wurde in der Abbildung vereinfacht. Aus Gründen der Übersicht wurden mehrere Relais zur Anpassung an die unterschiedlichen Spannungsebenen verschiedener Komponenten im Labor nicht dargestellt. Der *shutdown circuit* wurde drahtbruchsicher mit Schließerkontakten ausgeführt. Eine Ausnahme bildet das IMD, welches seinen Schaltkontakt bei Unterschreitung des Mindestisolationswiderstandes öffnet. Um eine Beschädigung der Inverter zu vermeiden, wird bei Unterschreitung des Grenzwertes der Mindestbatteriespannung das Zuschalten des TS verhindert. Über den Digitalausgang des VN1630-CAN-Adapters können die AIRs direkt über den am Teststand vorhandenen PC deaktiviert werden. Stellt die Regelung der Akkumulatorsimulation in Form eines Umformersatzes einen fehlerhaften Zustand fest, ist auch diese fähig die Antriebe vom TS zu trennen²⁷. Die Versorgung des GLVS am Teststand erfolgt über einen 12V-Akkumulator, wie er auch im Kraftfahrzeugbau verwendet wird. Das GLVS kann wie im Regelwerk vorgeschrieben durch einen GLVMS freigeschaltet werden.

Die VCU und alle nötigen Sensoren und Aktoren werden direkt über das GLVS versorgt. Komponenten, die eine andere Spannungsebene für ihren Betrieb benötigen, müssen diese intern umwandeln. Die Inverter der Antriebe und die Kühlpumpen selbst sind für den Betrieb in einem Kraftfahrzeug ausgelegt und können demnach ebenfalls direkt an das GLVS angeschlossen werden, ebenso wie die Sensoren des Kühlsystems. Das Kühlsystem ist allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Benutzerschnittstelle in Form des Bedienpanels ist ebenfalls für einen Anschluss an das GLVS vorgesehen. Dieses enthält folgende Bedienelemente:

- Zündungsplus KL15, um Inverter zu aktivieren

²⁷ Die Simulation des Akkumulators ist Bestandteil eines anderen Projektes und ist von dieser Arbeit unabhängig.

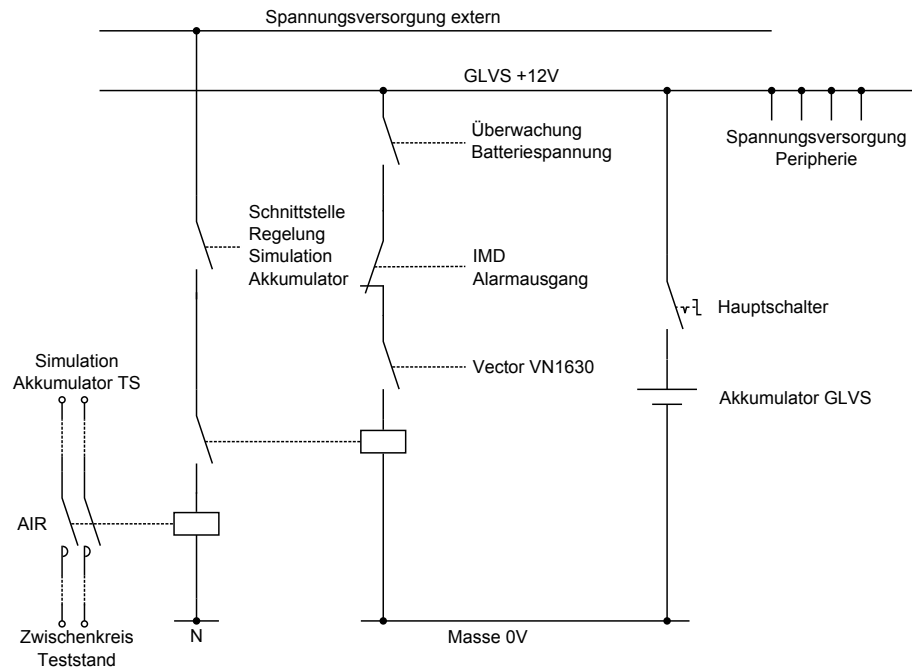


Abbildung 4.1: Verdrahtung GLVS Teststand

- Starttaster KL50 und Stoptaster, um den Antrieb zu aktivieren bzw. deaktivieren²⁸
- TSAL um *TS Aktiv* zu signalisieren
- Ready-To-Drive-Sound, um Betriebsbereitschaft der Antriebe zu signalisieren

Eine genauere Betrachtung der Pedaleinheit erfolgt in Abschnitt 4.2.3 auf Seite 42.

Die Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite zeigt einen Überblick über die Komponenten am Teststand und ihrer Kommunikation untereinander. Wie in Abschnitt 4.1 auf Seite 37 bereits angesprochen wurde, bilden beide Antriebe jeweils ein separates CAN-Netzwerk. Dies ist durch die identischen und nicht änderbaren Botschafts-IDs notwendig. Die Überwachung des Teststandes erfolgt über den VECTOR VN1630 CAN-Adapter, welcher mit beiden CAN-Netzwerken verbunden ist. Die Belastungsmaschine wird über den CAN-Adapter angesteuert, wogegen die Steuerung der Antriebsmaschine wie im Rennfahrzeug durch die VCU erfolgt. Am Teststand benötigte Sensoren und Aktoren werden über ein Erweiterungsmodul ebenfalls von der VCU angesteuert. Dies betrifft hauptsächlich das Bedienpanel als Benutzerschnittstelle und die Temperatursensoren der Kühlung, die zu deren Regelung verwendet werden können. Die Pedaleinheit ist direkt im CAN-Netzwerk der Antriebsmaschine eingebunden. Näheres findet sich im entsprechenden Abschnitt. Die am Teststand vorhandenen Kühlpumpen verfügen über eine Anschlussmöglichkeit an ein Local Interconnect Network (LIN), welche durch die VCU bereitgestellt wird.

²⁸ Aus Sicherheitsgründen wird der Starttaster erst mit Spannung versorgt, wenn KL15 betätigt wurde.

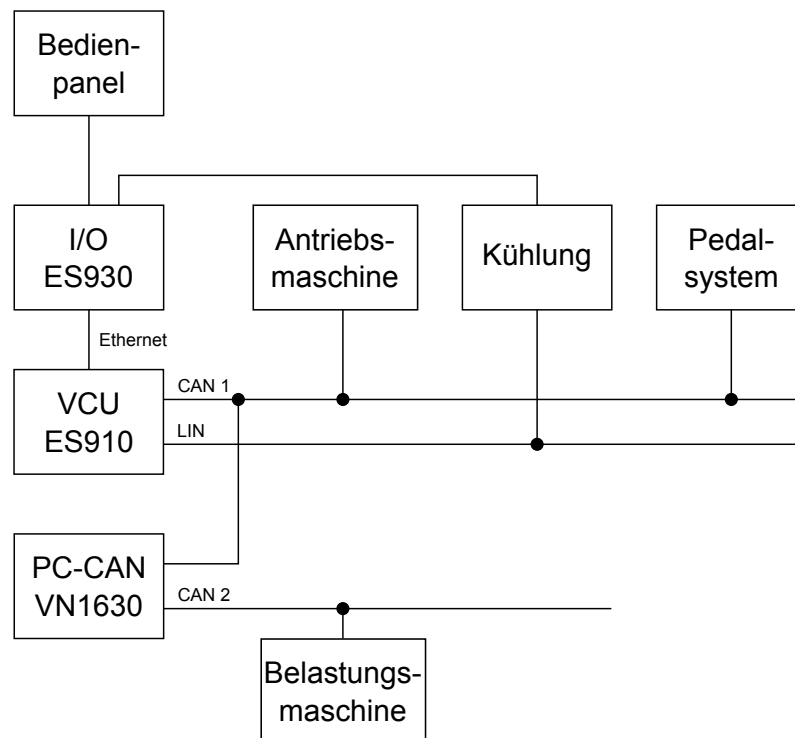


Abbildung 4.2: Kommunikation Komponenten Teststand

4.2.2 Auswahl der VCU

Als zentrale Steuerung des Rennfahrzeuges dient die Vehicle Control Unit (VCU). Zu Beginn der Arbeit wurden zwei Möglichkeiten der Realisierung diskutiert. Durch den erstmaligen Einsatz eines Elektrofahrzeuges und die daraus resultierende komplette Neuentwicklung des Rennfahrzeuges erscheint eine Eigenentwicklung der VCU, neben dem fehlenden teaminternen Wissen über die Entwicklung solcher sicherheitskritischer und komplexer Komponenten, als unrealistisch. Für den Automotivebereich werden beispielsweise von der Firma PHYTEC MESSTECHNIK GMBH Entwicklerboards angeboten, der Realisierungsaufwand ist aber immer noch sehr groß²⁹. Fertige frei programmierbare Lösungen werden beispielsweise von den Firmen dSPACE GMBH und ETAS GMBH angeboten. Die ETAS GmbH unterstützt das Team diesbezüglich im Rahmen eines Sponsorings mit Hard- und Software, somit entfällt entgegen der ursprünglichen Aufgabenstellung die Auswahl der VCU bzw. ist sie auf Produkte von ETAS beschränkt. Als VCU wird die ES910 genutzt. Diese zeichnet sich durch nachfolgend genannte Eigenschaften aus:

- Steuergerät für Prototypen
- Abmessungen: 36 mm x 126 mm x 160 mm

²⁹ Für die Freescale MPC5554 Plattform wird beispielsweise die RAppID Toolbox angeboten, die zusammen mit dem SIMULINK Coder die Softwareentwicklung vereinfacht [17, Seite 10]. Die Konstruktion eines kompletten Steuergerätes, das mechanisch und elektrisch für den Renneinsatz ausgelegt ist, ist trotzdem nicht zu unterschätzen.

- Eigenmasse: 850 g
- Betriebstemperaturbereich: -40°C bis $+70^{\circ}\text{C}$
- Schutzart: IP30 [2, Seite 75]
- Betriebsspannungsbereich: 6 bis 32 V DC, verpolungssicher
- Schnittstellen: 2 CAN/LIN-Anschlüsse, Ethernet-Schnittstellen zur Programmierung und Peripherieanbindung
- OSEK Echtzeitbetriebssystem
- Unterstützung modellbasierter Entwicklung über MATLAB/SIMULINK

Als Prototypingsteuergerät besitzt es eine höhere Rechenleistung gegenüber Seriensteuergeräten, demzufolge ist es also auch für aufwendige Regelalgorithmen geeignet. Der vorgesehene Einsatz in Prototypen bedingt eine robuste mechanische Auslegung, die im Renneinsatz ebenfalls gefordert ist. Durch die kompakten Abmessungen ist eine flexible Positionierung im Fahrzeug möglich, was durch den begrenzten Platz im Rennfahrzeug auch notwendig ist. Der weite Temperaturbereich der VCU wird vor allem bei Rennen in Südeuropa benötigt, die aktive Kühlung kann sich dort als vorteilhaft erweisen. Die Schutzart IP30 ist leider nicht ausreichend, um das Steuergerät ungeschützt montieren zu können. Speziell für den *raintest* ist ein zusätzlicher Schutz durch verdeckte Montage hinter Verkleidungsteilen nötig. Durch den weiten Betriebsspannungsbereich ist der Anschluss direkt an das GLVS möglich. Der Verpolungsschutz ist nicht relevant, da die VCU im Rennfahrzeug fest verbaut wird. Die VCU besitzt zwei getrennte CAN-Schnittstellen zur Kommunikation mit weiteren Komponenten. Diese können jeweils als LIN-Schnittstelle genutzt werden, dann entfällt jedoch die CAN-Funktionalität des jeweiligen Kanals. Da ein LIN-Kanal für das Ansteuern der Kühlungspumpe dient, wäre es nicht möglich die Komponenten des Rennfahrzeugs nachträglich auf zwei getrennte CAN-Kanäle aufzuteilen³⁰. Aus diesem Grund wird die VCU durch ein ES921-Modul ergänzt, was zwei weitere CAN-Kanäle hinzufügt. Die verwendete VCU besitzt keine Eingänge, um Sensoren und Aktoren direkt anzuschließen. Diese werden am Teststand hauptsächlich für den Test der Algorithmen der VCU und der Kühlung benötigt. Am Teststand wird für den Entwicklungsprozess ein über Ethernet anschließbares Messmodul verwendet³¹. Für das Rennfahrzeug wird ein eigenes Messmodul entwickelt, was das Einbinden der Sensoren und Aktoren in das CAN-Bussystem des Fahrzeuges ermöglicht. Gegenwärtig ist die Entwicklung allerdings noch nicht abgeschlossen.

Durch das Echtzeitbetriebssystem ist eine Priorisierung sicherheitsrelevanter Algorithmen möglich. Diese können modellbasiert entwickelt und durch die der VCU beigelegten Software als Tasks dem Echtzeitbetriebssystem hinzugefügt werden. Durch die Verwendung von MATLAB/SIMULINK in Verbindung mit dem SIMULINK CODER wird eine plattformunabhängige Softwareentwicklung gewährleistet, was die Weiterverwendung der

³⁰ Eine spätere Aufteilung in ein getrenntes Bussystem für den Antrieb und die Peripherie ist denkbar.

³¹ Dabei ist ein ES930 IO-Modul vorhanden, dass eine Vielzahl von analogen und digitalen Ein- und Ausgängen inklusive Sensorspannungsversorgung zur Verfügung stellt.

Algorithmen ermöglicht, sobald die VCU im Fahrzeug verbaut wird³². In Abschnitt 5.1 auf der nächsten Seite wird auf das Softwarekonzept am Teststand näher eingegangen.

4.2.3 Pedaleinheit

Um den Teststand als Fahrsimulator zu nutzen, wurde eine Pedaleinheit angefertigt, die aus den im Regelwerk geforderten *torque* und *brake encoder* besteht³³. Die Konstruktion wurde an die Pedalkonstruktion des Vorjahresfahrzeuges angelehnt. Die Pedalstellung wird mit jeweils zwei Linearpotentiometern vom Typ VARIOHM ELPM gemessen³⁴. Dabei verfügt die Pedaleinheit über einstellbare Endanschlüsse, welche einerseits die Potentiometer vor Zerstörung schützen und andererseits eine Fehlererkennung bei Drahtbruch bzw. Kurzschluss erlauben.

Ein Entwicklungsboard mit einem Atmel AT90CAN Mikrocontroller und eine Platine mit einem externen Analog-Digital-Converter (ADC) ist bereits vorhanden. Der Controller erfasst zyklisch alle $10ms$ die Stellung aller Potentiometer und versendet sie anschließend als CAN-Botschaft. Er stellt später im CAN-Netzwerk der Antriebsmaschine auch am Rennfahrzeug einen Knoten dar. Die Programmierung erfolgte im Vorfeld der Arbeit, sodass nur ein Umbau auf die Pedaleinheit erfolgen musste. Hierfür waren kleinere Arbeiten an der ADC-Platine notwendig. Für den Anschluss der Potentiometer wurden Anschlussklemmen aufgelötet und die Referenzspannungsversorgung des ADCs geändert. Diese und die Versorgung der Potentiometer erfolgen entweder über die Spannungsversorgung des Entwicklungsboards oder über eine externe Spannungsversorgung, was über Jumper geändert werden kann. Weiterhin sind laut Regelwerk Pull-Up- bzw. Pull-Down-Widerstände nötig, um einen Drahtbruch eines Sensors sicher erkennen zu können [13, EV2.3.10]. In der Pedaleinheit werden beide Arten so verwendet, dass ein Drahtbruch einem unbetätigten Pedal entspricht³⁵. Eine Überprüfung der *encoder* auf Plausibilität erfolgt nicht in der Mikrocontrollersoftware, sondern muss in der VCU implementiert werden.

³² In diesem Fall kann das in MATLAB/SIMULINK erstellte Modell mithilfe eines von VECTOR INFORMATIK bereitgestellten Targets für den SIMULINK CODER auch in VECTOR CANOE verwendet werden.

³³ Diese entsprechen dem Gas- bzw. Bremspedal der konventionell betriebenen Fahrzeuge.

³⁴ Aus Kostengründen wurden nur zwei Potentiometer beschafft. Für den Test des Fehleralgorithmus kann deshalb jeweils nur ein Pedal ausgewertet werden.

³⁵ Die bei Pedalbetätigung in der Sensorspannung ansteigenden Sensoren erhalten einen Pull-Down-Widerstand, wogegen die bei Betätigung abfallenden Sensoren einen Pull-Up-Widerstand erhalten.

5 Definition und Implementierung der Algorithmen

Die Sicherheitsanforderungen und generellen Richtlinien für die Entwicklung von Steuerungssoftware sowie der Einsatz von elektronischen Systemen im Kraftfahrzeugbereich werden in der ISO 26262 besprochen. Diese ist für Personenkraftfahrzeuge im Serieneinsatz mit einer Gesamtmasse von 3500 kg konzipiert. In [5, Seite 1] heißt es: „ISO 26262 does not address unique E/E systems in special purpose vehicles such as vehicles designed for drivers with disabilities“. Dies schließt die Anwendung für ein Rennfahrzeug bzw. einen Prototypen aus. Stattdessen wird zur Entwicklung das Regelwerk der Formula SAE nach [13] umgesetzt.

5.1 Softwarekonzept Teststand

Die Softwareentwicklung sollte soweit wie möglich modellbasiert erfolgen. Die Abbildung 5.1 auf Seite 45 zeigt die Darstellung des Softwarekonzeptes des Teststandes. Als zentrales Simulationstool kommt dabei MATLAB/SIMULINK von THE MATHWORKS, INC. zum Einsatz. Dieses ist als Hochschullizenz vorhanden und enthält eine große Anzahl spezieller Toolboxen, die die Entwicklung beschleunigen. Hier sind unter anderem die CONTROL SYSTEM TOOLBOX für das Design und Optimierung der Regelalgorithmen, STATEFLOW für das Design endlicher Zustandsmaschinen, die SIMSCAPE TOOLBOX für die physikalische Modellierung und die VEHICLE NETWORK TOOLBOX für den vereinfachten Zugriff auf DBC-files zu nennen. Die damit erstellten Algorithmen für die Antriebs- und Belastungsmaschine werden im Simulationsmodell auf ihre Funktionsfähigkeit und -güte überprüft. Anschließend wird mithilfe des SIMULINK CODERS C-Code erzeugt, welcher anschließend in die Software der Antriebs- und Belastungsmaschine eingebunden wird.

Beide Antriebe werden über ein getrenntes CAN-Bussystem parametrisiert und angesteuert. Die Überwachung der Antriebe erfolgt über einen Windows-PC mittels CAN-Adapter. Gleichzeitig können Messungen für eine spätere Analyse aufgezeichnet werden. Um die Belastungsmaschine anzusteuern, wird als Software VECTOR CANOE eingesetzt, welches eine Programmierung in einer C-ähnlichen Sprache, der CAN Access Programming Language (CAPL), erlaubt. Grundfunktionen, wie das zyklische Senden der von der Belastungsmaschine benötigten CAN-Botschaften, wie auch die Bedienung des Teststandes und Funktionen, die beide Antriebe simultan ausgeführt müssen, werden direkt in CAPL programmiert. Da sich die Restbussimulation nur auf den an die VCU zurückgegebenen Status des AMS beschränkt, erfolgt die Programmierung ebenfalls in CAPL. Komplexere Funktionen werden in SIMULINK designed und als dynamische Bibliothek eingebunden, die durch das VECTOR Target aus dem Modell erzeugt werden.

Die Simulinkschnittstellen steuern über Systemvariablen den Antrieb nur indirekt an, um das Timing der zyklischen Kommunikation einzuhalten.

Da die Antriebsmaschine, also die Maschine des Rennfahrzeuges, über die VCU von ETAS angesteuert wird, wird zur Erstellung der Steuergerätesoftware ETAS INTECRIO genutzt. Damit ist es möglich in ETAS ASCET und MATLAB/SIMULINK erstellte Modelle zusammen mit nativ in C-Code geschriebener Software zu verwenden. Dabei wird aus Kompatibilitätsgründen nur auf Code zurückgegriffen, der mit dem ETAS-Target des SIMULINK CODERS erstellt wurde³⁶. Das zugrunde liegende Modell kann dann, wenn die VCU im Rennfahrzeug montiert wird, mithilfe des SIMULINK CODERS als dynamische Bibliothek in CANOE eingebunden werden und so auch die Antriebsmaschine mithilfe des CAN-Adapters und einem Windows-PC angesteuert werden. Mit INTECRIO erfolgt die Verknüpfung der Schnittstelle des Modells mit den durch die Peripherie bereitgestellten Ein-/Ausgängen und den CAN-Botschaften sowie die Aufteilung der Softwaremodule auf die Tasks des im Steuergerät verwendeten Echtzeitbetriebssystems. Das zyklische Senden der vom Antrieb benötigten CAN-Signale durch die VCU wird hier ebenfalls parametrisiert.

Für die Kalibrierung der im Steuergerät ausgeführten Software über XCPoverEthernet steht ETAS INCA zur Verfügung, CANOE besitzt die XCPoverEthernet-Funktionalität aber ebenfalls. Eine Erprobung ist erst im Anschluss an die Arbeit möglich.

5.2 Vorbereitende Arbeiten

5.2.1 Berechnung der Trägheitsmomente

5.2.1.1 Nachbildung der Fahrzeugträgheit

Die für die Berechnung benötigten Fahrzeugdaten werden in Tabelle 5.1 auf Seite 46 dargestellt, wobei die Masse der Reifen und Felgen Schätzungen darstellen und sich diese Daten im Verlauf der Entwicklung des Rennfahrzeuges noch ändern können. Die angegebene Fahrzeugmasse ist eine vorläufige Zielsetzung für das Fahrzeug, die eingehalten werden soll. Die Berechnung wurde, wie in Abbildung 5.2 auf der nächsten Seite zu sehen ist, in die Komponenten Fahrzeug, Antriebsstrang und die permanenterregte Synchronmaschine (PSM) unterteilt. Ein Teil des Antriebsstranges kann erst nach der kompletten Konstruktion nachgebildet werden³⁷. Eine Abschätzung ist zu diesem Zeitpunkt wenig sinnvoll, da noch zu wenig Anhaltspunkte zur Konstruktion der betreffenden Komponenten vorhanden sind. Die entsprechenden Trägheitsmomente werden

³⁶ Auf die Integration von mit C-Code geschriebenen Funktionen wird verzichtet. Zur direkten Integration ist entweder INCODIO von SYSTECS notwendig, was nicht verfügbar ist bzw. muss andernfalls eine XML-Datei als Schnittstelle selbst geschrieben werden.

³⁷ Als Beispiel wären hier das Getriebe, das Differential und die Verbindungswellen zu nennen.

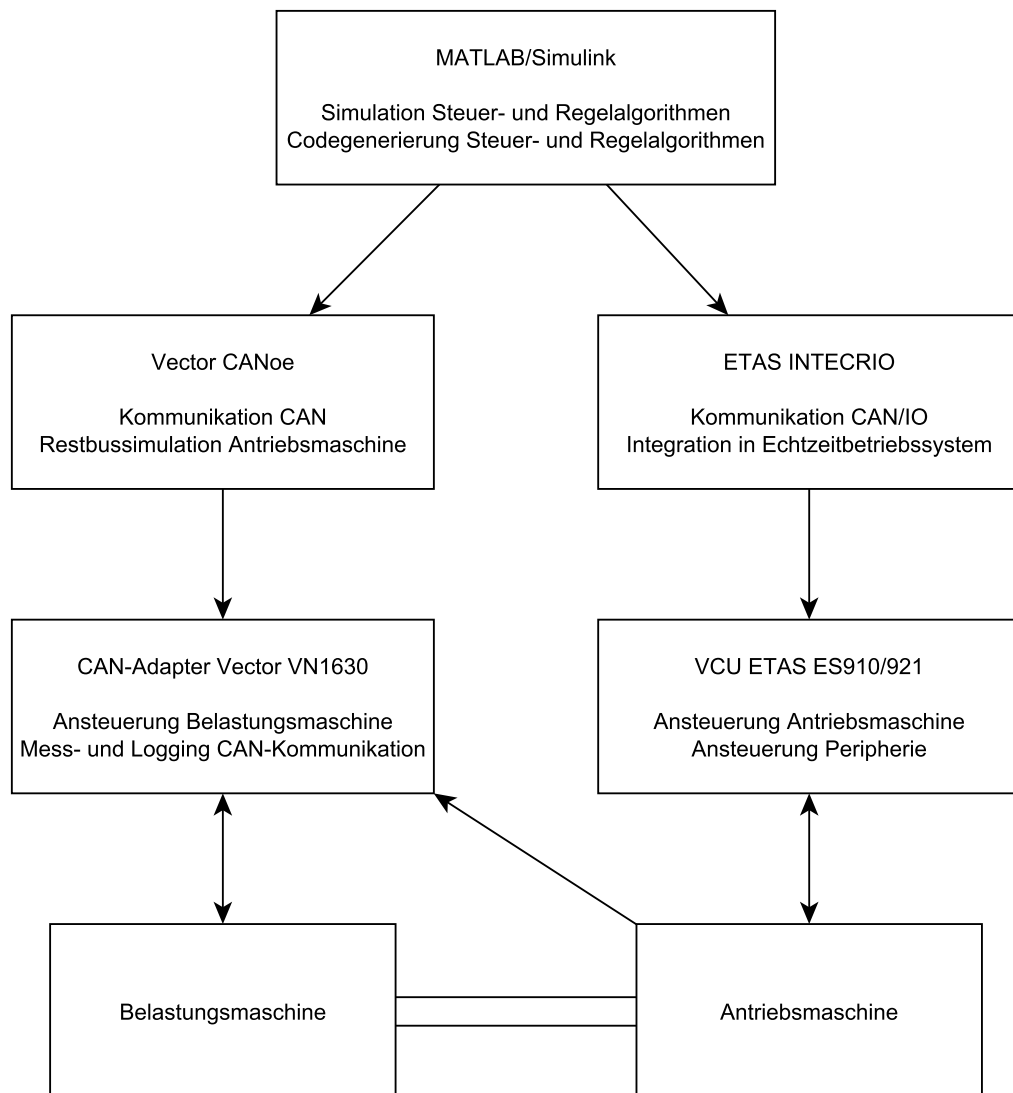


Abbildung 5.1: Softwarekonzept am Teststand

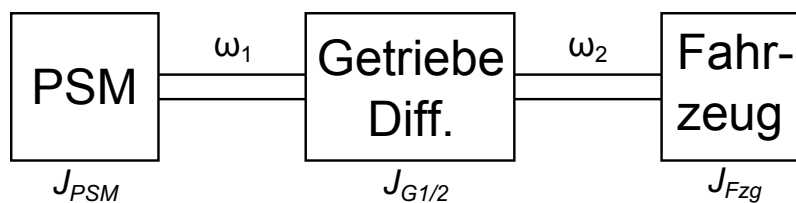


Abbildung 5.2: Übersicht Anordnung Rennfahrzeug

Fahrzeugmasse		Felge		Reifen	
r_{Rad}	$m_{Fahrzeug}$	r_{Felge}	m_{Felge}	r_{Reifen}	m_{Felge}
250 mm	330 kg ³⁹	165,1 mm	4 kg	250 mm	3 kg

Tabelle 5.1: Relevante Fahrzeugdaten

Fahrzeug	Räder	PSM	Gesamtträgheit
0,5729 kgm ²	0,0329 kgm ²	0,017789 kgm ² [12, Seite 122]	0,6237 kgm ²

Tabelle 5.2: Ersatzträgheitsmomente des Fahrzeuges

in Tabelle 5.2 dargestellt. Für die Berechnung des Trägheitsmomentes, verursacht durch die Fahrzeugmasse, wurde die Gleichung 2.10 auf Seite 7 verwendet. Bei der Trägheit der Räder müssen dabei das Übersetzungsverhältnis und der Wirkungsgrad des später entworfenen Getriebes berücksichtigt werden. Das Übersetzungsverhältnis wird voraussichtlich $i_G = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 6$ betragen. Eine nachträgliche Anpassung am Teststand bei einer Änderung ist jedoch leicht möglich, genauso wie die Trägheiten des restlichen Antriebsstranges einfach hinzugefügt werden können. Der Wirkungsgrad des Getriebes ist noch nicht bekannt und wird vorerst vernachlässigt³⁸. Zur Vereinfachung werden die Felgen und die Reifen jeweils als Zylindermantel angenähert, woraus sich das Ersatzträgheitsmoment für ein Rad nach Tabelle 2.1 auf Seite 5 und Gleichung 2.7 auf Seite 6 zu

$$J_{Rad} = (4 \text{ kg} \cdot (0,1651 \text{ m})^2 + 3 \text{ kg} \cdot (0,2500 \text{ m})^2) \frac{1}{6^2 \cdot 1} = 0,0082 \text{ kgm}^2$$

ergibt. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums des Rennfahrzeuges zu Beginn der Arbeit und den damit verbundenen Abschätzungen wird auf eine Verwendung des statischen Reifenhalmessers verzichtet. Stattdessen wird der Radius des unbelasteten Reifens genutzt. Die Ersatzträgheit, die sich aus der Fahrzeugmasse ergibt, berechnet sich nach Gleichung 2.10 auf Seite 7 zu $J_{Fzg} = \frac{330 \text{ kg} \cdot 0,2500 \text{ m}^2}{6^2 \cdot 1 \cdot 1} = 0,5729 \text{ kgm}^2$. Die Gesamtträgheit wiederum berechnet sich nach der Gleichung 2.11 auf Seite 7 zu

$$J_{gesamt} = J_{PSM} + J_{Fahrzeug} + 4 \cdot J_{Rad} = 0,6237 \text{ kgm}^2$$

. Zur besseren Übersicht sind die Ersatzträgheitsmomente noch einmal in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

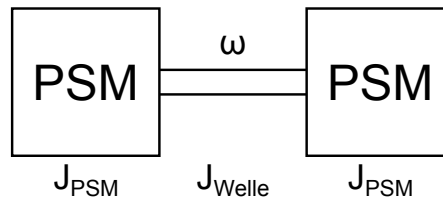


Abbildung 5.3: Übersicht Anordnung Teststand

	Welle
Länge	270 mm
Radius ⁴¹	11 mm
Masse	896 g

Tabelle 5.3: Relevante Daten Teststand

5.2.1.2 Nachbildung der Trägheit des Testaufbaus

In der Tabelle 5.3 werden die für die Berechnung der Trägheit des Testaufbaus benötigten Daten dargestellt. Dabei setzt sich die Berechnung, wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, aus den beiden PSMs und der gemeinsamen Welle zusammen⁴⁰. Zur Vereinfachung wird die Welle als Vollzylinder angenähert, woraus sich das Ersatzträgheitsmoment nach Tabelle 2.1 auf Seite 5 zu $J' = J = \frac{m \cdot r^2}{2} = \frac{0,896 \text{ kg} \cdot (0,011 \text{ m})^2}{2} = 0,000054 \text{ kgm}^2$ ergibt. Da kein Getriebe in der Anordnung vorhanden ist, muss auch keine Übersetzung beachtet werden. Das Trägheitsmoment der PSM kann direkt der *Technischen Kundenunterlage* entnommen werden. Hieraus ergibt sich das Gesamtträgheitsmoment nach Gleichung 2.11 auf Seite 7 zu

$$J_{ges} = 2 \cdot J_{PSM} + J_{Welle} = 2 \cdot 0,017789 \text{ kgm}^2 + 0,000054 \text{ kgm}^2 = 0,0356 \text{ kgm}^2$$

Zur besseren Übersicht sind die Ersatzträgheitsmomente noch einmal in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Welle	PSM	Gesamtträgheit Teststand
0,000054 kgm ²	0,017789 kgm ² [12, Seite 122]	0,0356 kgm ²

Tabelle 5.4: Ersatzträgheitsmomente des Teststandes

³⁸ Bei späterer Berücksichtigung muss beachtet werden, dass sich je nach dem ob der Motor das Fahrzeug antreibt oder rekuperiert sich ein anderes Trägheitsmoment ergibt, da der Wirkungsgrad das wirksame Moment von der Antriebs- zur Abtriebsseite oder umgekehrt verringert. Es muss also die Energieflußrichtung beachtet werden.

³⁹ Diese Masse beinhaltet eine Masse von 260 kg für das Fahrzeug selbst und 70 kg für den Fahrer.

⁴⁰ Die Welle wird mit zwei Positionierhülsen fixiert. Deren Trägheitsmoment ist aber noch geringer als die der Welle und damit vernachlässigbar klein.

⁴¹ Die Zähne des Zahnrades wurden vernachlässigt.

5.2.2 Fehlererkennung am Teststand

Eine Maßnahme gegen die Gefahr *Ungewolltes Beschleunigen bzw. Abbremsen eines Antriebes* ist die Fehlererkennung der CAN-Kommunikation. Auch am Teststand ist eine fehlerhafte Kommunikation gefährlich, sei es durch falsche Sollwerte oder durch nicht registrierte Abschaltbefehle im Fehlerfall. Auch die Antriebe selbst können eine Fehlermeldung absetzen, die durch die Teststandssteuerung dann nicht registriert bzw. bearbeitet wird. Die Antriebe selbst haben bereits für Nachrichten mit kritischem Inhalt eine Fehlererkennung eingebaut. Fehlende Nachrichten werden über einen *Messagecounter* ebenso ausgewertet, wie Fehler in der Übertragung der Daten per *Checksumme*. Dabei ist jedoch nicht bekannt ab welcher Fehlerzahl bzw. welcher Anzahl fehlender Nachrichten eine Reaktion in Form einer Abschaltung der Antriebe erfolgt. Aus Zeitgründen erfolgt vorerst am Teststand keine Implementierung dieser Algorithmen zwischen den restlichen Komponenten bzw. keine Auswertung der *Checksumme* und des *Messagecounters* von kritischen Nachrichten der Antriebe. Die Erstellung einer *Checksumme* und eines *Messagecounters* wird aber zur Ansteuerung der Antriebe benötigt, weswegen diese trotzdem kurz beschrieben werden.

Der *Messagecounter* der Antriebe besteht dabei aus einem Zähler, der zyklisch inkrementiert und bei Erreichen des Maximalwertes wieder zurückgesetzt wird. Die *Checksumme* besteht aus einem Paritätsbyte, welches über die restlichen Bytes der Botschaft gebildet wird. Ankommende Nachrichten können mit demselben Algorithmus auf Fehler geprüft werden, in dem dieser auf alle Bytes der Botschaft inklusive der Checksumme angewendet wird. Ergibt dies den Wert Null, ist kein Einfachfehler aufgetreten.

Für die Ansteuerung der Antriebsmaschine durch den PC mit CANOE wurde der Fehleralgorithmus bereits im Vorfeld der Arbeit programmiert und getestet. Für die Verwendung bei Ansteuerung der Antriebsmaschine mit der VCU musste die Verfahrensweise angepasst werden. Beide Implementierungen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

5.2.2.1 Checksummen- und Messagecounteralgorithmus zur Ansteuerung des Inverters in CANOE

Die Ansteuerung der Belastungsmaschine über CANOE hat den Vorteil, neben dem direkten Zugriff auf die physikalischen Größen über die in der Kommunikationsmatrix vorgegebene Skalierung auch direkt auf die Rohwerte der Botschaft zugreifen zu können. Die Bildung der Checksumme über alle Bytes erfolgt damit direkt in der CAPL-Programmiersprache der Software über XOR-Verknüpfungen, bevor eine Nachricht zyklisch ausgegeben wird. Vorher wird eine Funktion zur Erstellung des *Messagecounters* aufgerufen. Dieser wird die ID der Botschaft übergeben und über eine Hilfsfunktion wird der Zählwert um Eins erhöht, solange der Maximalwert noch nicht erreicht wurde. Wurde dieser erreicht erfolgt ein Rücksetzen des Zählers. Am Ende der Funktion wird der Zählwert zurückgegeben, der dem entsprechenden Signal zugeordnet wird. Der Aufruf

der Funktion erfolgt ebenfalls zyklisch und unabhängig vom erfolgreichen Senden der CAN-Botschaft.

5.2.2.2 Checksummen- und Messagecounteralgorithmus zur Ansteuerung des Inverters in SIMULINK

Die Verwendung der ETAS VCU bedingt eine Berechnung der Fehleralgorithmen zur Ansteuerung der Antriebsmaschine im Steuergerät selbst. Eine Implementierung in C-Code und das Einbinden in die Software der VCU ist über INTECRIO möglich ⁴². Dies hat allerdings den Nachteil, dass die Erstellung der XML-ähnlichen Schnittstellendatei, die zur Einbindung des Codes in die Steuergerätesoftware nötig ist, von Hand durchgeführt werden muss. Eine automatische Erstellung ist nur über eine spezielle externe Software möglich, die aber nicht zur Verfügung steht. Eine eigenständige Erstellung dieser Datei wird als sehr aufwendig angesehen. Stattdessen werden die Algorithmen in MATLAB/SIMULINK erstellt. Aufgrund der Eigenschaft der ETAS-Toolbox, dass generell die physikalischen Größen übergeben werden, ist dies allerdings ebenfalls recht kompliziert, da sich die Rohwerte nicht an Bytegrenzen orientieren. Dies ist an Abbildung 5.4 auf der nächsten Seite erkennbar, wobei die Rohwerte als Bytes jeweils eine Zeile einnehmen und die physikalischen Werte farbig markiert wurden. Eine Nutzung vorgefertigter Blöcke der VEHICLE NETWORK TOOLBOX, die in der Lage sind die Signale der Nachricht in Rohwerte in dieser Anordnung zu wandeln, ist aufgrund des speziellen Datentyps nicht mit dem Codegenerierungstarget von ETAS kompatibel. Allerdings sind die entsprechenden Bitoperationen in SIMULINK vorhanden.

Die einzelnen Signale werden zuerst über die in der Kommunikationsmatrix vorgegebene Skalierung von ihrer physikalischen in ihre ganzzahlige Repräsentation gewandelt und an den Berechnungsblock der Checksumme übergeben. Anschließend werden die für ein Byte benötigten Werte über Bitschiebeoperationen an die korrekte Position geschoben. Nach einer Maskierung der Werte erfolgt ein Zusammensetzen der einzelnen Bytes über bitweise ODER-Blöcke. Anschließend kann aus den einzelnen Bytes die *Checksumme* über einen bitweise XOR-Block gebildet werden. In Abbildung 5.5 auf der nächsten Seite ist die prinzipielle Struktur des Algorithmus anhand einer Beispielnachricht dargestellt. Für die Bildung des *Messagecounters* existiert in SIMULINK bereits ein Zählerblock, der sich bei Erreichen seines oberen Grenzwertes automatisch zurückstellt.

Der Test der Fehleralgorithmen kann mithilfe des in CANOE erstellten Algorithmus durch Einfügen eines Prüfknotens erfolgen. Dieser prüft das korrekte Hochzählen des Messagecounters und berechnet die Checksumme über alle Bytes inklusive der in SIMULINK berechneten Prüfsumme. Bei korrekter Durchführung und ohne eine Störung der Kommunikation muss diese Prüfsumme 0x00 ergeben.

⁴² Dies hat weiterhin den Vorteil, dass der in der CAPL-Programmiersprache erstellte Code weiterverwendet werden könnte, da die Syntax stark an C orientiert ist.



Abbildung 5.4: Beispiellayout einer CAN-Nachricht

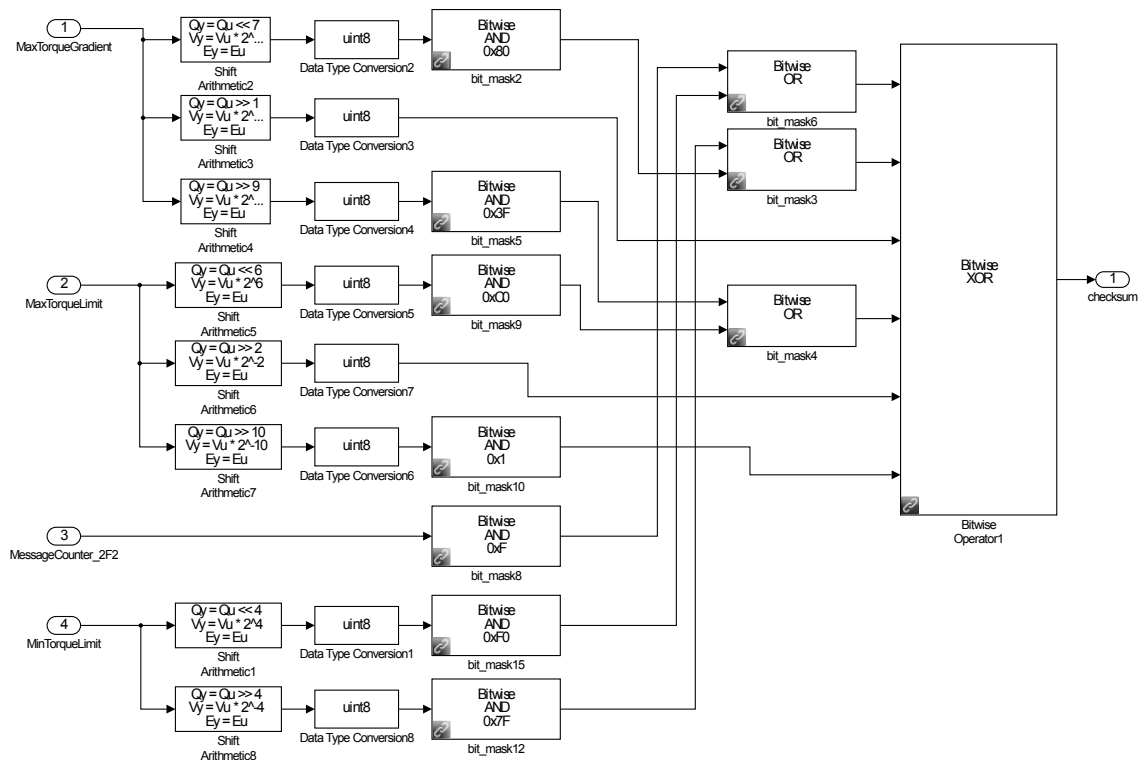


Abbildung 5.5: Checksummenberechnung in SIMULINK am Beispiel einer CAN-Nachricht an den Antrieb

5.2.3 Bedienung des Teststandes

Die Bedienung des Teststandes erfolgt über CANOE. Das virtuelle Bedienpanel wurde teilweise schon im Vorfeld der Arbeit erstellt und zum Überwachen der Antriebe und ihrer ungeregelten Ansteuerung genutzt. Im Rahmen der Arbeit wurden weitere Anzeigen und Bedienelemente hinzugefügt, die ein Testen der erstellten Software am Prüfstand ermöglichen. Dazu wurde je eine Anzeigefläche erstellt, die die Zustandsmaschine der VCU und deren Drehmomentberechnung nachbildet. Auf eine komplette Darstellung des Bedienpanels wird hier verzichtet. Der zum Test erstellte Teil wird in Abschnitt 6.2.2 auf Seite 96 dargestellt.

5.3 Trägheitssimulation durch die Belastungsmaschine

5.3.1 Anforderungen

Die Belastungsmaschine am Teststand soll die rotatorische und translatorische Trägheit eines Rennfahrzeuges, deren Berechnung in Abschnitt 5.2.1.1 auf Seite 44 erfolgte, abbilden. Die Antriebsmaschine des Systems darf also keinen Unterschied im Vergleich zu einem Einsatz am Fahrzeug registrieren. Hierzu ist ein schnelles Anregeln der Drehzahlkennlinie erforderlich, ohne dass deutliches Überspringen auftritt. Aufgrund der direkten Kopplung der Antriebe stellt das eine schwierige Anforderung dar, da die mechanischen Trägheiten und damit auch die Dämpfung der Reaktion des Systems auf ein Sollmoment der Antriebsmaschine sehr gering ist. Bei Vorgabe eines stationären Momentes der Antriebsmaschine ist eine vollständige Abbildung der Beschleunigung des Rennfahrzeuges gewünscht. Ein rampenförmiges Moment, wie es durch Betätigung per Pedaleinheit häufig vorkommt, soll ebenfalls zu einer exakten Abbildung der Beschleunigung führen. Zu beachten ist ebenfalls die Möglichkeit der Rekuperation der Antriebe. Die Belastungsmaschine muss also auch im regenerativen Bremsbetrieb der Antriebsmaschine funktionsfähig sein und den eintretenden Abfall der Drehzahl simulieren. Dabei muss der Algorithmus unabhängig von externen Sensoren und mit den, über die CAN-Kommunikation, zurückgemeldeten Messwerten der Antriebe arbeiten.

Um die Antriebe nicht durch Tests des Algorithmus zu gefährden, ist der Algorithmus in einem Simulationstool zu erproben. In der ursprünglichen Aufgabenstellung sollte dies mit der Software PORTUNUS von ADAPTED SOLUTIONS realisiert werden. Aufgrund des in Abschnitt 5.1 auf Seite 43 beschriebenen Softwarekonzeptes ist es jedoch sinnvoller, die Simulation in der Software MATLAB/SIMULINK durchzuführen, um aus den in der Simulation getesteten Regelalgorithmen direkt C-Code generieren zu können. Aufgrund der geringen mechanischen Trägheiten im System soll ein Betrieb des Teststandes ohne die Trägheitssimulation der Belastungsmaschine nicht möglich sein, da schon geringe

Sollmomente der Antriebsmaschine ein schnelles Ansteigen der Systemdrehzahl auf unzulässig hohe Werte verursachen. Der Trägheitssimulationsalgorithmus muss also über geeignete Schnittstellen mit der überlagerten Teststandsteuerung kommunizieren. Auf einen Abschaltbefehl der überlagerten Steuerung muss ebenfalls im Algorithmus reagiert werden, was ebenso über geeignete Schnittstellen passieren muss.

5.3.2 Konzept und Struktur

5.3.2.1 Schnittstellen des Algorithmus und ihre Verwendung

Der Regelalgorithmus berechnet direkt den Sollwert der Belastungsmaschine. Dieser wird an die Teststandssteuerung übergeben und dort je nach Betriebsmodus der entsprechenden CAN-Botschaft des Antriebes zugeordnet.

Eingangsseitig benötigt der Algorithmus zur Berechnung des Sollmomentes die aktuelle Systemdrehzahl. Um die Reaktion des Rennfahrzeuges zu berechnen, wird weiterhin das Moment der Antriebsmaschine benötigt. Um den Algorithmus flexibel zu halten, soll eine Verwendung des Sollmomentes und des Istmomentes der Antriebsmaschine möglich sein. Das Sollmoment hat den Vorteil, dass der Regler schneller auf eine Änderung des Systemzustandes reagieren kann, noch bevor die Antriebsmaschine ein Moment ausgibt. Demgegenüber steht der Nachteil, dass im Inverter aus Sicherheitsgründen eine parametrierbare Sollwertrampe integriert ist, die ein zu schnelles Ansteigen des Sollmomentes im Anstieg begrenzt. Dadurch ist der reale Drehmomentsollwert des Antriebes nicht bekannt. Diese Informationen werden dem Modell direkt durch die CAN-Botschaften übergeben.

Der Regelalgorithmus benötigt ebenfalls eine Schnittstelle zur überlagerten Teststandssteuerung. Dies soll über ein boolesches Signal erfolgen, mit dem die Teststandsteuerung die Regelung deaktivieren kann. Dies kann erforderlich sein, falls eine Störung am Teststand eingetreten ist, die ein Deaktivieren der Antriebe erforderlich macht bzw. wenn die Antriebe aufgrund des gewählten Betriebsmodus noch nicht freigegeben wurden. Dieses Signal muss neben dem Sperren des Sollmomentes auch ein Sperren der Integratoren gewährleisten. Diese würden sonst ein hohes Stellsignal erzeugen, da das Stellsignal aufgrund der Sperrung keine Wirkung im System verursachen kann.

5.3.2.2 Struktur der Regelung

Grundlage der Regelung ist der in Abschnitt 2.2 auf Seite 11 dargestellte Regelkreis. Der Regelkreis am Teststand wird mit den entsprechenden Größen in Abbildung 5.6 auf der nächsten Seite dargestellt. Die Grundgrößen bestimmen sich nach der Gleichung 2.1 auf Seite 4, dem Drehmomentengleichgewicht. Für den Anwendungsfall am

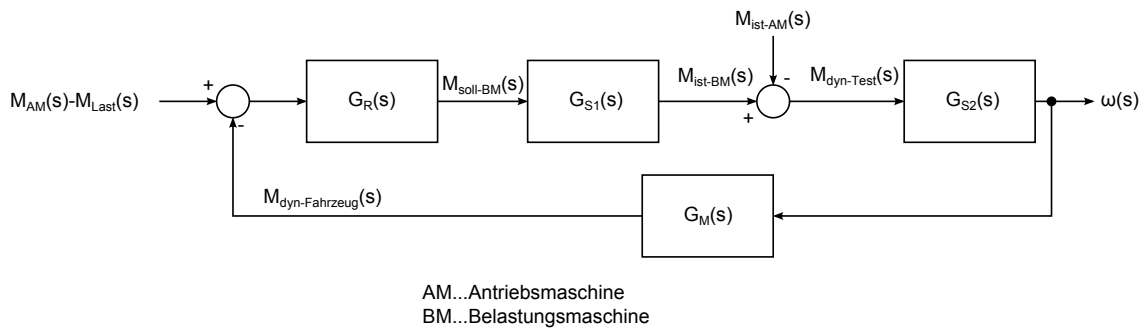


Abbildung 5.6: Regelkreis Teststand

Teststand lautet es

$$0 = M_{BM} - M_{AM} - M_{dyn_{Teststand}} - M_{Reib}$$

, wobei durch die Betrachtung der Belastungsmaschine das Moment der Belastungsmaschine M_{BM} als Quelle und das Moment der Antriebsmaschine M_{AM} , sowie die Reibung und das dynamische Moment als Senke angesehen werden. Da die Maschinen ihr inneres Reibmoment in ihrer Regelung bereits berücksichtigen und das restliche Reibmoment vernachlässigt werden kann, vereinfacht sich diese Gleichung zu

$$0 = M_{BM} - M_{AM} - M_{dyn_{Teststand}} = M_{BM} - M_{AM} - J_{Teststand} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

. Stellt die Antriebsmaschine ein Moment, beschleunigt der Antrieb aufgrund der geringen Systemträgheit und dem verfügbaren dynamischen Moment schon bei geringen Momenten sehr stark, was als Störung an der Summationsstelle sichtbar wird. Um die geringe Systemträgheit auszugleichen, muss die Belastungsmaschine ihr Moment derart abgeben, dass das noch zur Verfügung stehende deutlich geringere dynamische Moment eine Beschleunigung des Systems wie am realen Rennwagen verursacht. Das Ziel der Regelung ist also, das dynamische Moment des Systems auszuregulieren. Dieses kann aus der zu messenden Größe der Winkelgeschwindigkeit ω zu $M_{dyn_{Fahrzeug}} = J_{Fahrzeug} \cdot \frac{d\omega}{dt}$ berechnet werden und stellt den Istwert der Regelung dar. Es handelt sich somit indirekt um eine Drehzahlregelung der Belastungsmaschine, die Ausgangsgröße des Regelkreises ist also die Winkelbeschleunigung. Als Stellsignal der Regelung dient dabei das Sollmoment der Belastungsmaschine. Das Moment der Antriebsmaschine wirkt als Störung, welches eine Drehzahländerung verursacht. Das Sollmoment der Belastungsmaschine ist mit einer Übertragungsstrecke mit dem Istmoment dieser Maschine verknüpft. Dies führt zu einer Teilung der Regelstrecke und ein Eingreifen der Störung zwischen diesen Strecken. Die Störung in Form der Antriebsmaschine muss demzufolge nur einen Teil der Strecke durchlaufen.

Betrachtet man das Drehmomentengleichgewicht des realen Fahrzeuges nach Gleichung 2.3 auf Seite 4 von der Antriebsseite her und betrachtet den Luftwiderstand als

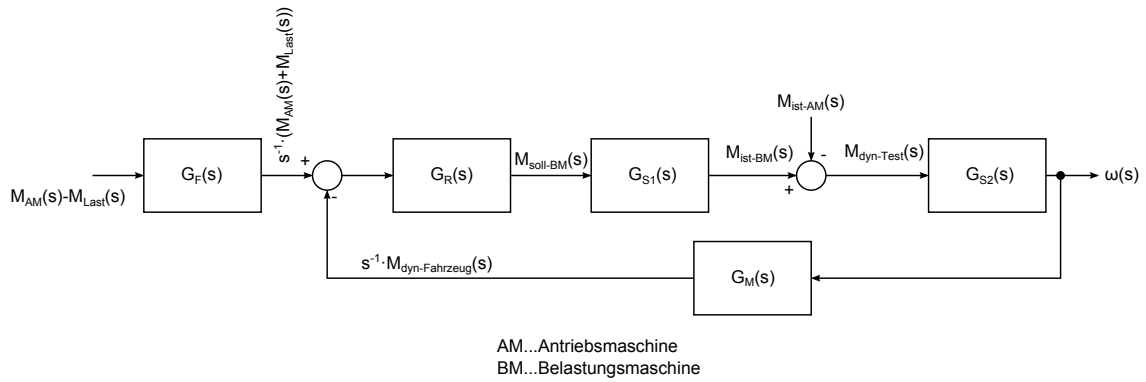


Abbildung 5.7: Modifizierter Regelkreis Teststand

Lastmoment, welches am Teststand zu einer Begrenzung der Drehzahl führt ⁴³, lässt sich der Zusammenhang

$$M_{AM} - M_{Last} = M_{dyn-Fahrzeug} = J_{Fahrzeug} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (5.1)$$

aufstellen. Da das dynamische Moment des Rennfahrzeuges am Teststand nachgebildet werden soll, stellt der linke Term demzufolge das Sollmoment der Belastungsmaschine dar. Der rechte Term stellt wiederum den Istwert dar. Der Regler muss somit das Moment der Belastungsmaschine derart ausregeln, dass eine Winkelbeschleunigung entsteht, die äquivalent zu der des Rennfahrzeuges ist.

Problematisch ist die Berechnung des dynamischen Momentes aus der Winkelbeschleunigung über eine Differentiation. Diese ist sehr empfindlich gegenüber Störungen in der Drehzahlmessung. Integriert man die Gleichung 5.1 auf beiden Seiten unter der Bedingung, dass die Trägheit zeitlich unabhängig ist, erhält man den Zusammenhang

$$\int (M_{AM} - M_{Last}) dt = J_{Fahrzeug} \cdot \omega = \int M_{dyn-Fahrzeug} dt$$

, in der keine Differentiation mehr enthalten ist. Im Regelkreis entspricht dies einer Transformation eines im Regler enthaltenen Integralanteils über die Regelabweichung hinweg in den Sollwert bzw. Istwert und einem dann vorhandenen Sollwertfilter. Der resultierende Regelkreis ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

5.3.2.3 Bestimmung der Übertragungsfunktionen

Übertragungsfunktion der Strecken Die Übertragungsfunktion der Strecke G_{S1} behandelt den Zusammenhang zwischen Soll- und Istmoment der Antriebe. Da die genaue

⁴³ Im Falle der Simulation der reinen Trägheit würde bei einem konstanten Antriebsmoment die Drehzahl des Systems theoretisch bis zur Zerstörung der Antriebe immer weiter ansteigen. Praktisch ist zwar noch eine geringe Reibung vorhanden. Diese ist jedoch so gering, dass nur sehr kleine Antriebsmomente am Teststand eingestellt werden könnten.



Abbildung 5.8: Sprungantwort Sollmoment-Istmoment Antrieb

interne Reglerstruktur unbekannt ist, ist für die Bestimmung der Charakteristik eine Messung erforderlich. Hierfür wurde das Sollmoment mit einer Sprungfunktion beaufschlagt und das Istmoment über die CAN-Schnittstelle aufgezeichnet⁴⁴. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Eine Approximation dieses Verhaltens ergibt nach [16, Seite 206] über die aus der Messung geometrisch ermittelte Anstiegszeit T_a und Verzugszeit T_u eine Übertragungsfunktion von

$$G_{S1}(s) = \frac{1}{s \cdot T_a + 1} \cdot e^{-s \cdot T_u} = \frac{1}{s \cdot 17 \text{ ms} + 1} \cdot e^{-s \cdot 15 \text{ ms}}$$

. Das enthaltene Totzeitglied kann nach [8, Seite 333] mit einem PTn-Glied angenähert werden, wobei eine höhere Ordnung zu einer besseren Annäherung führt. Erfolgt die Annäherung durch ein Glied erster Ordnung, ergibt sich

$$G_{S1}(s) = \frac{1}{s \cdot 17 \text{ ms} + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot 15 \text{ ms} + 1}$$

, was zwei in Reihe geschalteten PT1-Gliedern mit nahezu identischen Zeitkonstanten entspricht. Die resultierende Übergangsfunktion wird in Abbildung 5.9 auf der nächsten Seite dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Abweichung vor allem im Bereich der Verzugszeit. Da eine Messung mit höherer Auflösung nicht möglich ist, ist aber selbst

⁴⁴ Aufgrund des Messaufbaus ist eine direkte Messung des Momentes nicht möglich. Ein Zugriff kann nur über die CAN-Botschaft erfolgen.

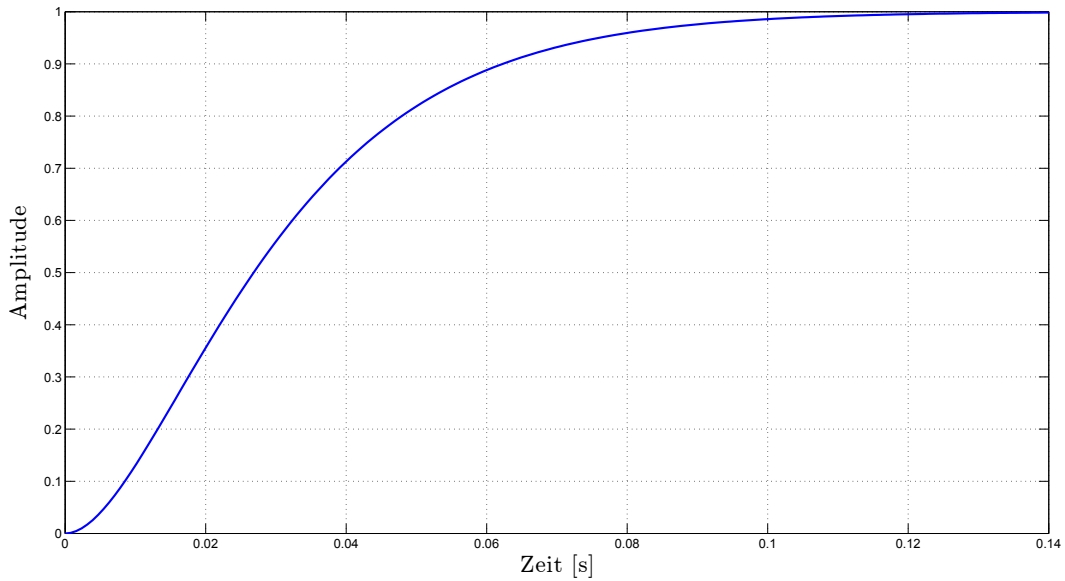


Abbildung 5.9: Übergangsfunktion Approximation Sollmoment-Istmoment

die Messung an dieser Stelle nur eine grobe Annäherung an die tatsächliche Reaktion der Maschine auf einen Sollwert.

Die Übertragungsfunktion der Strecke G_{S2} beschreibt das Verhältnis zwischen dem dynamischen Moment am Teststand und der Drehzahl. Diese ergibt sich demzufolge aus der Gleichung $M_{DynTeststand} = J_{Teststand} \cdot \frac{d\omega}{dt}$ zu

$$G_{S2}(s) = \frac{\omega(s)}{M_{dynTeststand}(s)} = \frac{1}{J_{Teststand} \cdot s} = \frac{1}{0,0356 \text{ kgm}^2 \cdot s}$$

, was einem I-Glied entspricht. Die gesamte Streckencharakteristik ergibt sich demnach zu

$$G_S(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) = \frac{1}{0,0356 \text{ kgm}^2 \cdot s} \cdot \frac{1}{s \cdot 17 \text{ ms} + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot 15 \text{ ms} + 1} \quad (5.2)$$

, wobei beachtet werden muss, dass die Störung in Form des Momentes der Antriebsmaschine zwischen den Streckenteilen auftritt. Die Strecke besteht somit aus einem I-Anteil und zwei verzögernden PT1-Anteilen.

Übertragungsfunktion des Messgliedes Das Übertragungsverhalten des Messgliedes ergibt sich aus der Gleichung

$$\int M_{dynFahrzeug} dt = J_{Fahrzeug} \cdot \omega$$

zu

$$G_M(s) = \frac{M_{dynFahrzeug}}{s \cdot \omega} = J_{Fahrzeug} = 0,6072 \text{ kgm}^2$$

und stellt ein P-Glied dar.

Übertragungsfunktion des Sollwertvorfilters Das Übertragungsverhalten des Sollwertvorfilters ergibt sich als reiner Integrator zu

$$G_V(s) = \frac{1}{s}$$

5.3.2.4 Bestimmung des Reglers

Um den benötigten Regler zu bestimmen, muss die Streckencharakteristik mit der Übertragungsfunktion nach Gleichung 5.2 auf der vorherigen Seite betrachtet werden. Von den beiden in der Antriebstechnik gebräuchlichen Regleroptimierungsverfahren kommt als Erstes das Betragsoptimum nach Abschnitt 2.2.1 auf Seite 12 in Betracht. Da die Strecke einen integralen Anteil aufweist, ist der Einsatz eines integralen Anteils im Regler nicht möglich. Dieser würde zusammen mit dem I-Anteil der Strecke und der Kompensation der dominanten Zeitkonstante eine Phasenverschiebung von -180° verursachen. Der I-Anteil der Strecke kann zwar, wie in Abschnitt 2.2.2 auf Seite 14 beschrieben wurde, einen stationären Sollwert ausregeln, aber die zwischen den beiden Teilen der Strecke einsetzende Störung in Form des Antriebsmomentes kann nicht kompensiert werden, selbst bei einem stationären Antriebsmoment. Stattdessen erfolgt die Optimierung nach dem symmetrischen Optimum. Die Strecke mit einem I-Anteil und zwei Verzögerungsgliedern erster Ordnung besitzt nicht die Form, in der das symmetrische Optimum normalerweise angewendet wird. Da die Zeitkonstanten sehr nahe beieinanderliegen, kommt ein Zusammenfassen zu einer Summenzeitkonstante, wie in Abschnitt 2.2.2 auf Seite 14 beschrieben wurde, nicht in Frage. Auch der dort beschriebene Einsatz eines PID-Reglers mit einer Kompensation der Zeitkonstante durch den zweiten Vorhalt kann nicht empfohlen werden, da die Messung dieser Zeitkonstante nur eine grobe Näherung dargestellt und unter nicht optimalen Bedingungen gemessen wurde. Eine falsche Anpassung des Reglers würde durch seinen D-Anteil eher Nachteile bringen. Da die Knickfrequenz größer als die dominante Zeitkonstante der Strecke ist, liegt der Abfall der Phase unter die Stabilitätsgrenze bei einer Frequenz, die sich oberhalb der Durchtrittsfrequenz befindet. In diesem Bereich liegt die Verstärkung des offenen Kreises unterhalb von Eins und Signale in diesem Frequenzbereich werden gedämpft und führen nicht zum Aufschwingen.

Die Parametrierung des Reglers mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{s \cdot T_N + 1}{s \cdot T_N} \quad (5.3)$$

erfolgt nach den Gleichungen 2.23 auf Seite 15 und 2.22 auf Seite 14. Da das Antriebsmoment als Störung auftritt, gleichzeitig aber auch zur Berechnung des Sollwertes dient, muss ein Kompromiss aus gutem Führungs- und Störverhalten gefunden werden. Anhand der Abbildung 2.7 auf Seite 15 wird der zur Berechnung nötige Parameter a auf den Wert Fünf festgelegt. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen geringem Überschwingen und kurzen Anregelzeiten bei Führungs- und Störverhalten dar. Die Reglerparameter berechnen sich dann mit der Verstärkung des offenen Kreises $K_0 = K_S \cdot K_M = 1 \cdot J_{\text{Fahrzeug}}$ und den Zeitkonstanten $T_1 = J_{\text{Teststand}}$ bzw. $T_\sigma = T_a$ zu

$$K_R = \frac{T_1}{a \cdot K_0 \cdot T_\sigma} = \frac{0,0356 \text{ kgm}^2}{5 \cdot 0,6237 \text{ kgm}^2 \cdot 17 \text{ ms}} = 0,6722 \frac{1}{s}$$

$$T_N = a^2 \cdot T_\sigma = 5^2 \cdot 17 \text{ ms} = 0,4250 \text{ s}$$

, wodurch sich eine Übertragungsfunktion von

$$G_R(s) = 0,6722 \frac{1}{s} \cdot \frac{s \cdot 0,4250 \text{ s} + 1}{s \cdot 0,4250 \text{ s}}$$

für den Regler ergibt. Der offene Kreis wurde mit MATLAB berechnet und ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} G_0(s) &= G_R(s) \cdot G_S(s) \cdot G_M(s) = \\ &= 0,6722 \frac{1}{s} \cdot \frac{s \cdot 0,4250 \text{ s} + 1}{s \cdot 0,4250 \text{ s}} \cdot \frac{1}{s \cdot 0,0356 \text{ kgm}^2} \cdot \frac{1}{s \cdot 17 \text{ ms} + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot 15 \text{ ms} + 1} \cdot 0,6237 \text{ kgm}^2 = \\ &= \frac{s \cdot 0,4192 + 0,9864}{s^4 \cdot 9,087 \cdot 10^{-6} + s^3 \cdot 0,00114 + s^2 \cdot 0,03563} \end{aligned}$$

, wobei der Sollwertvorfilter nicht in den offenen Kreis eingeht [11, Seite 2.30]. Der Amplituden- und Phasengang ist in Abbildung 5.10 auf der nächsten Seite dargestellt. Der Amplitudenrand beträgt trotz der zusätzlichen Zeitkonstante $A_{Rd} = 19,6 \text{ dB}$. Der Phasenrand ist durch die Wahl des Faktors $a = 5$ mit $\phi_{Rd} = 57^\circ$ sehr groß und lässt noch genügend Reserven zur Stabilitätsgrenze. Allerdings befindet sich das Maximum der Phase durch das zusätzliche PT1-Glied nicht mehr exakt bei der Durchtrittsfrequenz, wie auch der zusätzliche Abfall im Amplitudengang durch dessen Knickfrequenz erkennbar ist.

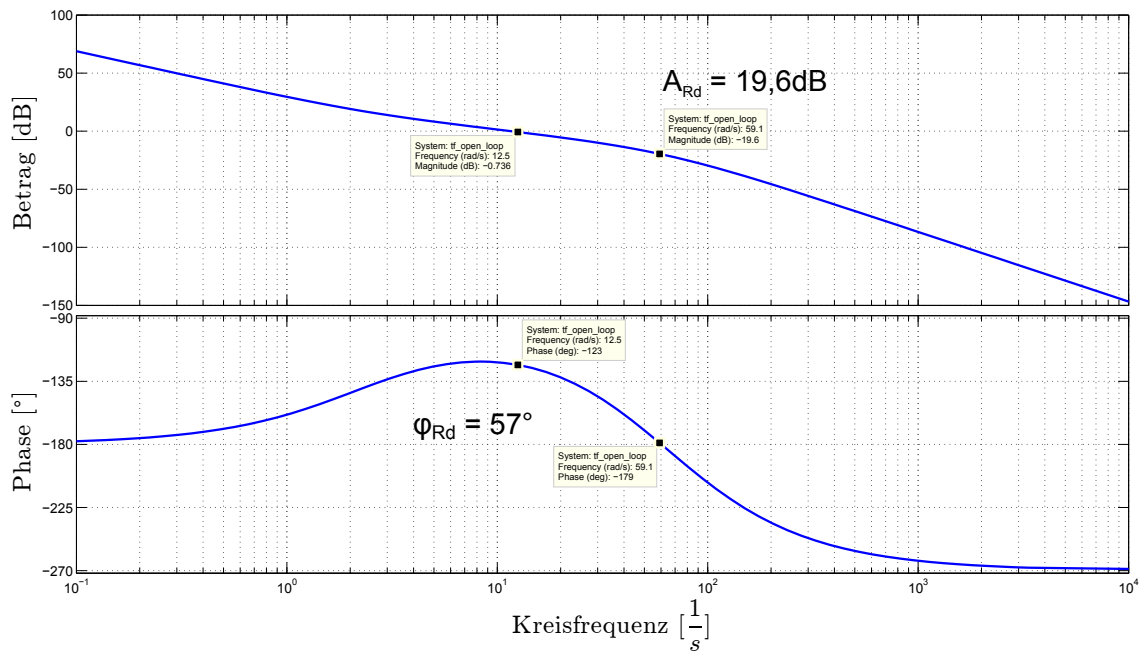


Abbildung 5.10: Amplituden- und Phasengang offener Kreis

5.3.2.5 Führungs-, Störverhalten und Stabilität

Die Führungs- und Störungsübertragungsfunktionen wurden mit der MATLAB-Funktion *feedback()* aus den ermittelten einzelnen Übertragungsfunktionen des offenen Kreises berechnet. Die Übertragungsfunktion des Führungsverhalten ergibt sich dabei mit dem Sollwertvorfilter zu

$$G_w(s) = \frac{s \cdot 0,6722 + 1,582}{s^5 \cdot 9,087 \cdot 10^{-6} + s^4 \cdot 0,00114 + s^3 \cdot 0,03563 + s^2 \cdot 0,4192 + s \cdot 0,9864}$$

. Das Störverhalten ergibt sich mit der negativ eingehenden Störung zu

$$G_z(s) = \frac{-s^3 \cdot 0,255 \cdot 10^{-3} - s^2 \cdot 0,032 - s}{s^4 \cdot 9,08710^{-6} + s^3 \cdot 0,00114 + s^2 \cdot 0,03563 + s \cdot 0,4192 + 0,9864}$$

. Bei beiden Gleichungen wurde auf die Angabe von Einheiten aus Übersichtsgründen verzichtet. Da in der Regelung die Änderung des Momentes der Antriebsmaschine in Soll- und Störgröße eingeht, ist die Aussagekraft der Führungs- und Störübertragungsfunktion, in denen die Störgröße bzw. Führungsgröße jeweils zu Null gesetzt wird, begrenzt. Die Auswertung bezüglich der im Abschnitt 5.3.1 auf Seite 51 beschriebenen Reaktion auf stationäre bzw. rampenförmige Sollmomente der Antriebsmaschine erfolgt stattdessen am Simulationsmodell in Abschnitt 6.1.1 auf Seite 88.

Um die Stabilität des geschlossenen Regelkreises bewerten zu können, wird der offene Kreis betrachtet. Für eine Bewertung mittels Nyquistkriterium wird nach [8, Seite 434]

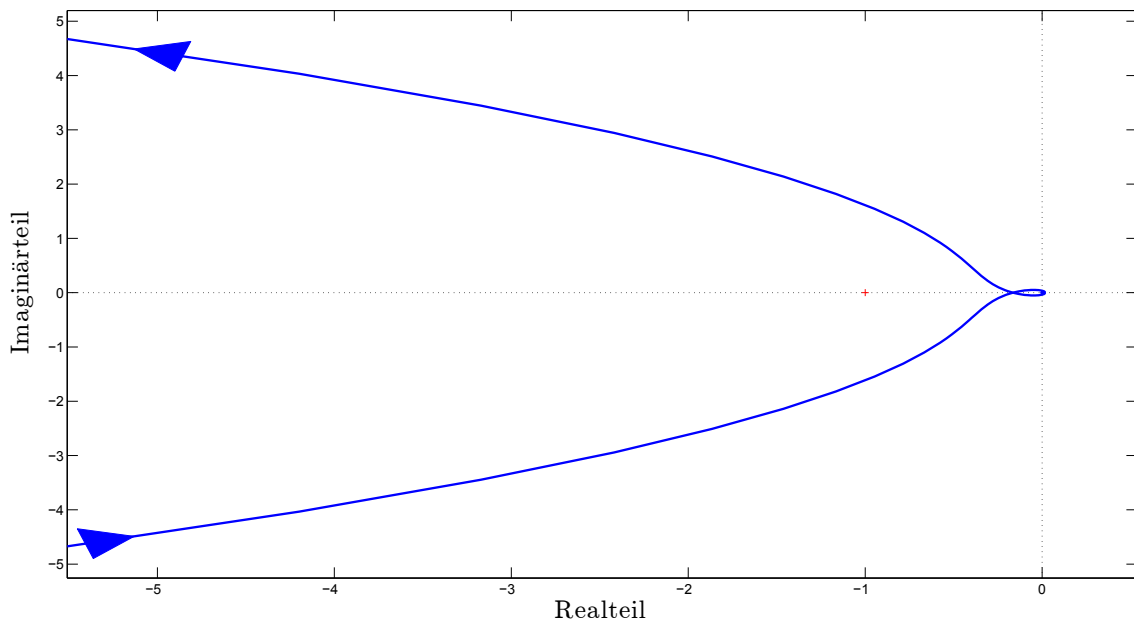


Abbildung 5.11: Nyquistdiagramm

folgende Reihenfolge empfohlen ⁴⁵:

1. Bestimmen der Anzahl der Pole mit positivem Realteil des offenen Kreises
2. Zeichnen des Nyquistdiagramms im Bereich $\omega = (-\infty, \infty)$
3. Stabilitätstest durch Prüfung der Anzahl der Umschlingungen des kritischen Punktes $(-1 + j \cdot 0)$

Der offene Kreis besitzt nur Pole mit negativem Realteil bzw. welche im Ursprung. Demzufolge darf der kritische Punkt nicht umschlungen werden. In Abbildung 5.11 ist das mittels der MATLAB-Funktion *nyquistplot()* erstellte Nyquistdiagramm des offenen Kreises stark vergrößert zu sehen. In der oberen Hälfte der Abbildung werden die negativen Frequenzen und in der unteren Hälfte die positiven Frequenzen dargestellt. Um sicherzugehen, dass die Approximation der Totzeit der Strecke keine Auswirkungen auf die Stabilität der Strecke hat, wurde nicht die Approximation, sondern ein Totzeitglied für die offene Kette genutzt. Das Nyquistdiagramm zeigt, dass der kritische Punkt nicht umschlungen wird. Demzufolge ist der geschlossene Regelkreis stabil.

5.3.3 Implementierung der Trägheitssimulation auf dem PC

Die Erstellung der Regelung erfolgt durch ein SIMULINK-Modell, welches mithilfe des CANOE-Targets übersetzt und dort als dynamische Bibliothek eingebunden wird. Die Berechnung des Reglers und der Trägheiten erfolgt durch ein MATLAB-Skript, um die

⁴⁵ Das Nyquistkriterium hat den Vorteil, dass die Stabilität von totzeitbehafteten Systemen bewertet werden kann.

Parametrierung des Modells durch CANOE zu ermöglichen⁴⁶. Die Erstellung des Modells erfolgt anhand des in Abbildung 5.7 auf Seite 54 dargestellten Regelkreises. Im Algorithmus selbst werden die Übertragungsfunktionen $G_M(s)$, $G_M(s)$ und $G_R(s)$ direkt implementiert⁴⁷. Diese sind in Abbildung 5.12 auf der nächsten Seite dargestellten Modell blau markiert, ebenso wie wichtige Größen des Modells. Das Sollmoment wird vor Übergabe an die Teststandssteuerung noch negiert, da die Trägheitsregelung als Drehmomentsenke wirkt und damit negativ in das Drehmomentengleichgewicht eingeht⁴⁸. Die Übergabe des Sollmoments bzw. das Einlesen des Soll- und Istwertes als auch die Aktivierung der Regelung erfolgen durch Funktionsblöcke der zum Target gehörenden Toolbox und anschließendem Anpassen an die Busstruktur des Modells. Dies ist auszugsweise für einen Eingang in Abbildung 5.13 auf der nächsten Seite dargestellt.

5.3.4 Erstellen des Simulationsmodells

Die Erstellung der Simulation wird nach dem in Abschnitt 5.1 auf Seite 43 beschriebenen Softwarekonzept in MATLAB/SIMULINK erstellt.

Konzept und Struktur Um die Busstruktur und die ganzzahlige Darstellung der CAN-Nachrichten abbilden zu können, wurde mithilfe von selbstgeschriebenen Funktionen und Funktionen der VEHICLE NETWORK TOOLBOX ein MATLAB-Skript erstellt, welches anhand der zum Antrieb mitgelieferten Kommunikationsmatrix ein Simulinkbusobjekt selber Struktur erzeugt. In diesem wird neben allen CAN-Nachrichten und Signalen auch der Datentyp abgebildet. Die Initialisierungswerte werden in einer weiteren Struktur abgebildet, mit der ein Zuweisen aller Initialisierungswerte mit einem Block möglich ist. Mittels spezieller in SIMULINK vorhandener Blöcke werden einzelne Signale des Busobjektes durch ihren Messwert ersetzt, während vorerst ungenutzte Signale auf ihrem Initialisierungswert belassen werden können. Dies ist auch anhand der Struktur der Simulation in Abbildung 5.14 auf Seite 63 erkennbar. Nahezu alle Komponenten übergeben ihre Messwerte bzw. entnehmen Messwerte aus der zentralen Busstruktur. Neben einer Nachbildung der Pedaleinheit handelt es sich noch um die Modelle der Ansteuerung der Antriebs- und Belastungsmaschine, deren physikalische Modelle sowie ein Referenzmodell, welches eine Überprüfung der Algorithmen erlaubt. Eine Berücksichtigung der ganzzahligen Sollwertvorgabe an die Antriebe am Teststand erfolgt durch Rundung der errechneten Sollmomente vor Übergabe an die jeweiligen Modelle.

⁴⁶ Werden die sich im Workspace befindlichen Variablen als Inline-Variablen markiert, erzeugt das CANOE-Target eine Schnittstelle mit der sich diese Variablen zur Laufzeit des Modells in CANOE ändern lassen.

⁴⁷ Durch die Verpolung der Antriebe am Teststand wird die Drehzahl vor der Übertragungsfunktion $G_M(s)$ noch negiert, da diese im Motorbetrieb sonst negativ ist.

⁴⁸ Die Implementierung erfolgte außerhalb des Modells und ist in der Abbildung nicht zu sehen.

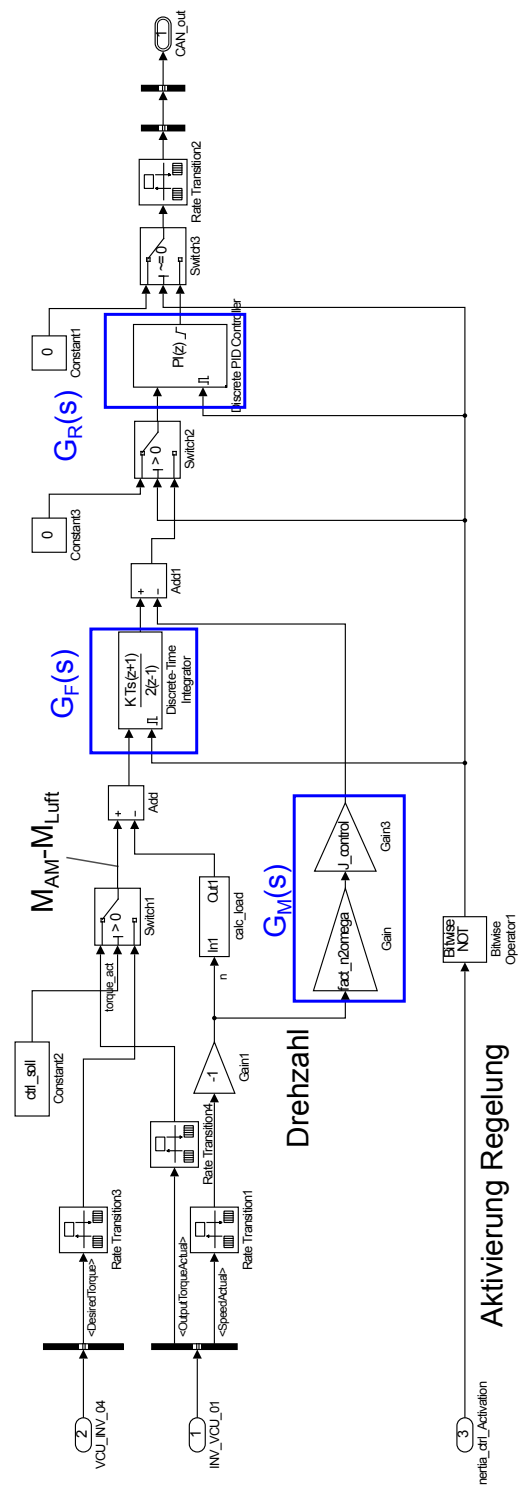


Abbildung 5.12: Modell Trägheitsregelung Belastungsmaschine

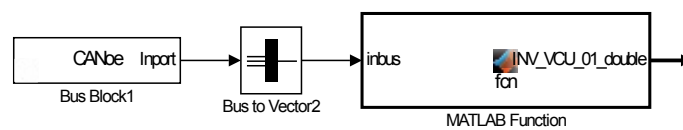


Abbildung 5.13: Modell Trägheitsregelung Belastungsmaschine - Verbindung Hardware

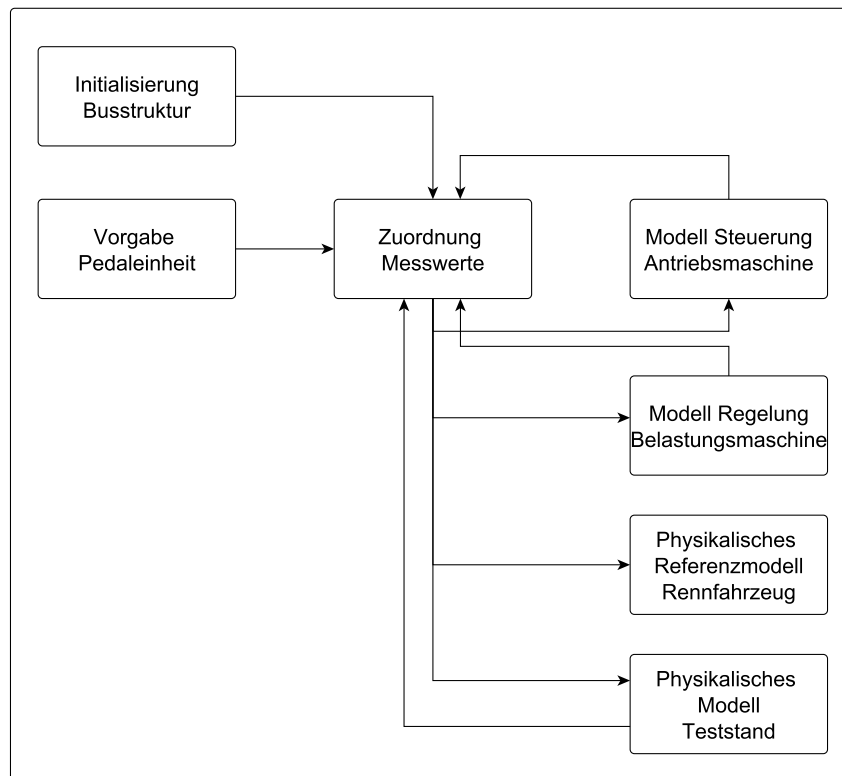


Abbildung 5.14: Simulation - Struktur Trägheitsregelung Belastungsmaschine

Implementierung Da die oberste Ebene dieselbe Struktur besitzt, wie in Abbildung 5.14 bereits dargelegt wurde, wird auf eine Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Das Modell befindet sich im Kapitel A auf Seite 107 des Anhangs. Die Initialisierungswerte werden an das Bussystem über einen *const*-Block übergeben. Die Vorgabe der Kennwerte der Pedaleinheit erfolgt über jeweils einem *Signalbuilder*-Block, wobei eine Skalierung auf die im Fahrzeug verwendeten Kennwerte erfolgt. Die Algorithmen der VCU und der Regelung der Belastungsmaschine werden bzw. wurden in den entsprechenden Abschnitten beschrieben. Für die Simulation der Systemträgheiten wurde die Toolbox SIMSCAPE genutzt, welche die Simulation von physikalischen Systemen unterstützt.

Das Referenzmodell des Rennfahrzeuges ist in Abbildung 5.15 auf der nächsten Seite zu sehen. Dem Modell wird das Sollmoment der Antriebsmaschine übergeben. Dieses speist das Streckenmodell $G_1(s)$, welches daraus das Istmoment der Antriebsmaschine berechnet. Dieses wird an eine ideale Drehmomentquelle übergeben, welche ein Teil des physikalischen Netzwerkes ist⁴⁹. Dieses besteht aus einer weiteren idealen Drehmomentquelle, die ein Gegenmoment in Form des nach Abschnitt 2.1.2 auf Seite 7 berechneten Strömungswiderstandes einspeist. Neben Drehmoment- und Geschwindigkeitssensoren enthält das Netzwerk noch eine dritte Komponente. Diese besteht aus

⁴⁹ Da der Streckenteil $G_2(s)$ das Momentengleichgewicht darstellt, erfolgt die Simulation durch das physikalische Netzwerk.

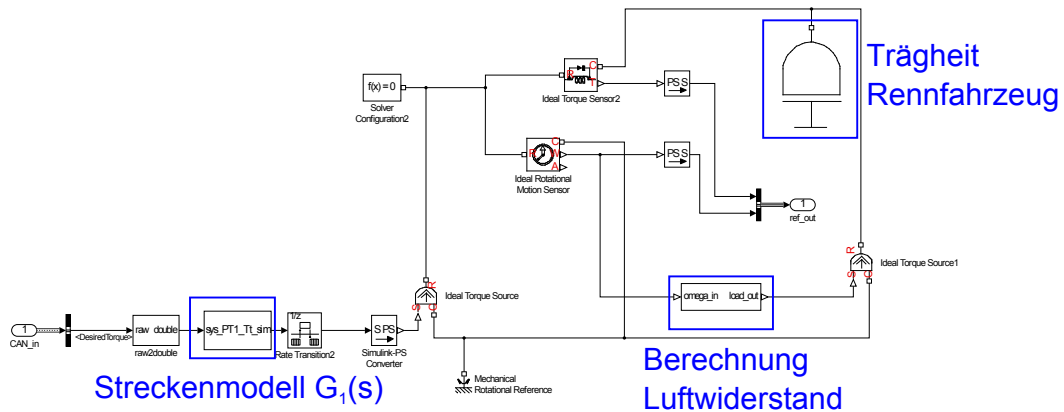


Abbildung 5.15: Simulation - SIMULINK Referenzmodell

einer durch die Toolbox bereitgestellte Trägheit, die als Vorgabe die in Tabelle 5.2 auf Seite 46 berechnete Fahrzeugträgheit besitzt. Diese wird in Abschnitt 6.1.1 auf Seite 88 genutzt, um die Funktionsweise der Trägheitsregelung nachzuweisen.

Das physikalische Modell des Teststandes besteht aus zwei Drehmomentquellen, die das jeweils über die Strecke $G_1(s)$ berechnete Istmoment der Antriebs- und Belastungsmaschine in das physikalische System einspeisen. Da die Belastungsmaschine das dynamische Moment so begrenzen soll, dass eine Beschleunigung wie am Rennfahrzeug auftritt, enthält das Modell zwar ebenfalls die durch die Toolbox bereitgestellte Trägheit, diese besitzt als Vorgabe allerdings die in Tabelle 5.4 auf Seite 47 berechnete Trägheit des Teststandes⁵⁰. Auf eine Darstellung des erstellten Modells wird aus Übersichtsgründen verzichtet, da der Aufbau nahezu identisch mit dem des Referenzmodells ist, mit der Ausnahme, dass beide Drehmomentquellen in das Netz einspeisen und sich die Parametrierung der Trägheit unterscheidet.

5.4 Fahrzeugantrieb durch die Antriebsmaschine

5.4.1 Anforderungen

5.4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Grundsätzlich soll das erstellte Simulinkmodell bzw. der daraus generierte Code mit möglichst wenig Anpassungen auf der VCU, wie auch auf einem PC lauffähig sein, was schon durch das gewählte Softwarekonzept bedingt ist. Ein Teil der Funktionen muss jedoch für jede Plattform extra entwickelt werden. Bei diesen Funktionen handelt es sich hauptsächlich um die Fehlererkennungsalgorithmen der Antriebe, welche schon in Abschnitt 5.2.2 auf Seite 48 diskutiert wurden.

⁵⁰ Weiterhin erfolgt die Simulation des Strömungswiderstandes ebenfalls durch die Belastungsmaschine.

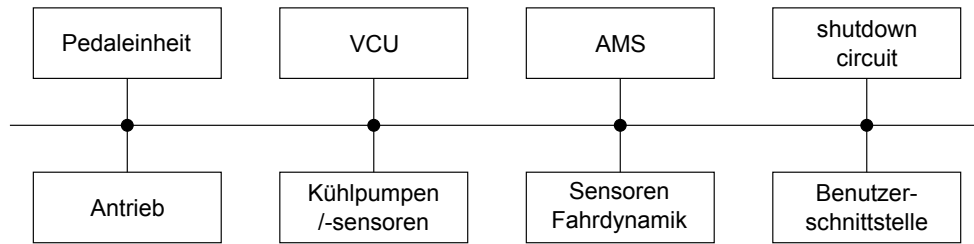


Abbildung 5.16: Antriebsrelevante Komponenten im Fahrzeug

Die VCU muss die Daten einer Vielzahl von Komponenten verarbeiten und durch entsprechende Botschaften mit ihnen kommunizieren. In der Abbildung 5.16 ist die Struktur der VCU und der Komponenten am Rennfahrzeug dargestellt, die Einfluss auf die Ansteuerung der Antriebsmaschine haben bzw. von ihr beeinflusst werden. Am Teststand erfolgt die Verbindung der VCU zur Peripherie durch das ES930-Modul bzw. über das CAN-Bussystem, mit Ausnahme der Pumpen, die über die LIN-Kommunikation der VCU direkt angeschlossen sind. Die Anbindung der Peripherie wird im Rahmen der Arbeit aus Zeitgründen noch nicht implementiert, muss jedoch schon frühzeitig vorgesehen werden⁵¹. Dies betrifft auch das Bedienpanel, welches die Benutzerschnittstelle im Fahrzeug nachempfinden soll. Dieses ist zwar elektrisch vorbereitet worden, kann ohne das Peripheriemodul im Zusammenhang mit der VCU aber nicht verwendet werden⁵². Das Kühlsystem mitsamt seiner Sensoren muss im Algorithmus nicht berücksichtigt werden, da dies Inhalt einer weiteren Arbeit ist. Auch die Einbindung der Fahrdynamiksenoren ist Aufgabe eines anderen Teammitgliedes. Das AMS ist noch nicht verfügbar und muss dementsprechend vorerst in Software nachgebildet werden⁵³. Dabei sind in der Kommunikationsmatrix der CAN-Kommunikation bereits Nachrichten für diesen Zweck vorgesehen. Diese sollten im Algorithmus bereits verwendet werden, um ein späteres Anpassen an das AMS zu erleichtern. Der *shutdown circuit* wird in großen Teilen am Teststand nachempfunden, nicht vorhandene Teile werden auch hier in der Software vorerst nachgebildet. Eine Ansteuerung in Form einer Abschaltung im Fehlerfall erfolgt über das übergeordnete System, wobei der Abschaltvorgang dem des Rennfahrzeuges nachempfunden werden soll⁵⁴.

Bei der Erstellung des Algorithmus der VCU geht es hauptsächlich um das Zusammenspiel zwischen der Pedaleinheit, dem *shutdown circuit*, der noch in Software ausgeführten Benutzerschnittstelle, dem AMS und dem Antrieb. Der Antrieb selbst verfügt über eine Vielzahl von Parametrierungsmöglichkeiten. Die meisten davon können unberück-

⁵¹ In SIMULINK erstellte Variablen können als parametrierbar deklariert und zum Test der Software mit CANOE angesteuert werden. In INTECRIO existiert eine ähnliche Möglichkeit des softwareseitigen Tests.

⁵² Teile davon, wie das TSAL, dürfen laut Regelwerk nicht über Softwarefunktionen angesteuert werden und betreffen die Entwicklung der Algorithmen der VCU auch nicht.

⁵³ Die Reaktion des AMS wird über CANOE simuliert. Diese beschränkt sich vorerst auf die Rückmeldung der entsprechenden Botschaften.

⁵⁴ Das übergeordnete System muss vor allem im Fehlerfall eines Antriebs beide Antriebe abschalten können. Der Abschaltbefehl wird wie im Rennfahrzeug von der VCU initialisiert, aber vom übergeordneten System ausgeführt.

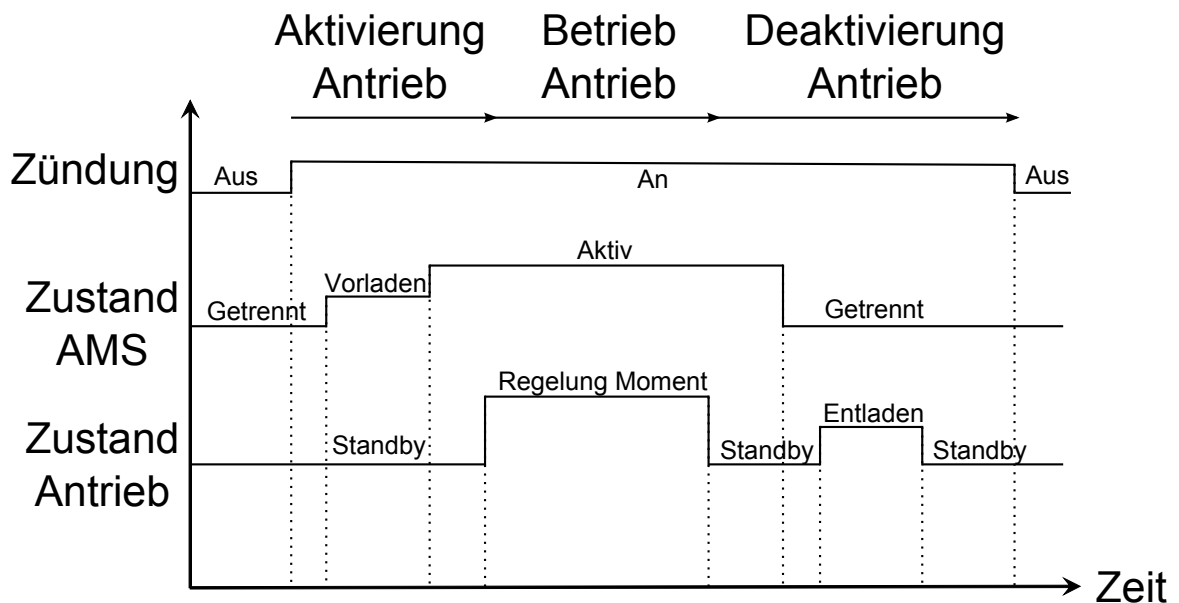


Abbildung 5.17: Aktivierungsvorschrift Antrieb - AMS [nach 12, Seite 25]

sichtigt bleiben, da ihre Parametrierung bereits im Vorfeld der Arbeit erfolgte⁵⁵. Das Zusammenspiel der Antriebe mit den restlichen Komponenten über die VCU zeigt sich an der Aktivierungsreihenfolge der Antriebsmaschine, die in Abbildung 5.17 dargestellt wird. Zu Beginn muss ein Freischaltbefehl in Form der Aktivierung der „Zündung“ erfolgen. Im Rennfahrzeug kann das bereits mit dem Aktivieren des TSMS erfolgen. Dies muss das System zum Vorladen des Zwischenkreises über ein Vorladeschütz veranlassen, sodass es nicht zu einer Überlastung aufgrund des hohen Einschaltstromes kommt. Nach Aktivieren der Hauptschütze soll ein Aktivieren der Antriebe durch einen Startbefehl des Nutzers möglich sein. Das Aktivieren der Zündung, nachfolgend als KL15 bezeichnet, muss vorher erfolgen, um den Antrieb am Rennfahrzeug in den Modus *Regelung Moment* zu versetzen. Möchte der Nutzer den Antrieb deaktivieren, soll er dies mit einem entsprechenden Befehl veranlassen können. Danach muss ein Deaktivieren des TS möglich sein bzw. muss vorher der Antrieb automatisch deaktiviert werden. Dabei ist ein schonendes, aber zügiges Abregeln des Antriebes nötig. Ist das TS vom Antrieb getrennt, soll die VCU ein automatisches Entladen des Zwischenkreises bewirken⁵⁶.

Die Software der VCU muss allerdings noch weitere Anforderungen erfüllen. So ist eine adäquate Reaktion auf relevante Fehler anderer Komponenten nötig. Weiterhin soll die Stellung des *torque* und *brake encoders* ausgewertet und auf Plausibilität geprüft werden. Auch die Leistungsbegrenzung des Antriebes muss durch die VCU erfolgen, Näheres dazu folgt in Abschnitt 5.4.1.2 auf der nächsten Seite.

⁵⁵ Beispielsweise sind sämtliche Parameter der Langzeitbelastung aufgrund des Renneinsatzes nicht von Relevanz.

⁵⁶ Dies stellt einen Schutz gegen die im Sicherheitskonzept beschriebene Gefahr *Elektrischer Schlag durch das TS* dar.

5.4.1.2 Relevante Vorschriften des Regelwerkes

Das Regelwerk der FSE enthält viele Regeln, die die Software der VCU betreffen. Am Teststand können diese nicht alle umgesetzt werden, werden hier aber trotzdem mit aufgeführt. Zur besseren Übersicht sind diese in Kategorien unterteilt.

Betriebsführung des Fahrzeuges

- Nach der Regel [13, EV 4.10.2] darf das Schließen der AIRs das TS zwar unter Spannung setzen, eine Fahrbereitschaft darf jedoch erst mit Betätigung des Starttasters entstehen, wobei das Bremspedal betätigt werden muss.
- Nach [13, EV 2.3.5] muss bei implausiblen Messwerten der *torque encoder* die Leistung des Antriebes heruntergefahren werden. Ein Deaktivieren und Entladen des TS ist nicht erforderlich.
- Die Regel [13, EV 5.1.7] besagt, dass bei Deaktivierung des TS während der Fahrt der Antrieb frei drehen muss und kein Bremsmoment an den Antrieb abgegeben werden darf ⁵⁷.
- Löst der *shutdown circuit* aus, darf durch einen Kondensator das Öffnen der AIRs um 250ms verzögert werden, um das Moment des Antriebes herunterfahren zu können [13, EV 5.1.8]. Dies bedingt durch die direkte Kopplung des *shutdown circuit* mit den AIRs eine Überwachung der auslösenden Sensoren durch die VCU.
- Der Fahrer muss im Fehlerfall das TS vom Cockpit aus (re-)aktivieren können, außer die Abschaltung erfolgte durch das AMS, das IMD oder den BSPD [13, EV 4.10.1].

Auswertung Pedaleinheit

- Eine Übertragung der Signale der *torque encoder* über ein Bussystem wie CAN ist erlaubt. Fehler der *encoder* müssen erkannt werden und zu einer entsprechenden Reaktion in Form eines Herunterfahrens des Antriebes führen, eine Prüfung innerhalb der VCU ist erlaubt [13, EV 2.3.9]. Ein Fehler wird als eine Abweichung der *encoder* untereinander von 10% definiert [13, EV 2.3.6].
- Nach [13, EV 2.5] muss ein Aktivieren der mechanischen Bremsen bei gleichzeitigem Betätigen der *torque encoder* mit mindestens 25% ihres Endwertes zu einem Abschalten des Antriebes führen. Dies muss bestehen bleiben bis das Signal der *torque encoders* unter 5% fällt, unabhängig ob die Bremse noch betätigt wird.

⁵⁷ Dies ist im Fehlerfall des Antriebes schwierig umzusetzen, da der Inverter dann oberhalb einer Drehzahl von $n = 7500 \frac{1}{\text{min}}$ die Wicklungen der Maschine kurzschließt, was zu einem Bremsmoment führt. Eine wenn auch aufwändige Lösung wäre eine im Notfall ansprechende mechanische Trenneinrichtung.

Drehmomentbereitstellung

- Laut Regelwerk [13, EV 2.21] darf die Leistung $P_{Zugrenz}$, die aus dem Akkumulator bezogen wird, 80 kW nicht übersteigen. Eine Verletzung des Regelwerkes liegt vor, wenn der Momentanwert für 100 ms bzw. der gleitende Mittelwert für mehr als 500 ms überschritten wird, was ein Energy Meter, welches sich zwischen Antrieb und Akkumulator befindet, überwacht.
- Ein Ansteuern des Antriebes, sodass dieser rückwärts fährt, ist nach [13, EV 2.2.8] verboten.
- Das durch den Fahrer gewünschte Sollmoment darf durch Steueralgorithmen nur verringert werden, der Fahrerwunsch stellt somit eine obere Begrenzung des Momentes dar [13, EV 2.3.12].

Rekuperation

- Regeneratives Bremsen ist nach [13, EV 2.2.7] nur bei einer Geschwindigkeit größer $5\frac{\text{km}}{\text{h}}$ erlaubt.
- Ein rein regeneratives Bremsen ist nur für die ersten 90% des Endwertes des *brake encoders* erlaubt. Oberhalb dieses Wertes muss die mechanische Bremse betätigt werden, regeneratives Bremsen ist aber weiterhin erlaubt [13, T 7.1.10].

5.4.2 Konzept und Struktur

Aufgrund der vielfältigen Anforderungen an die Software der VCU kann sie in mehrere Bestandteile aufgeteilt werden, welche im Folgenden beschrieben werden.

5.4.2.1 Schnittstellen des Algorithmus und ihre Verwendung

Aufgrund des Zusammenspiels mit den Komponenten Pedaleinheit, *shutdown circuit*, der Benutzerschnittstelle, dem AMS und dem Antrieb benötigt die Software der VCU entsprechende Schnittstellen zu diesen Komponenten. Die Pedaleinheit, das AMS und der Antrieb werden mit der VCU über das CAN-Bussystem verbunden. Die Software bezieht diese Informationen also direkt aus den entsprechenden CAN-Nachrichten. Der Zustand des *shutdown circuit* muss durch Sensoren bekannt sein. Hierfür reicht es der VCU allerdings aus den Zustand des BSPD zu kennen, da dies für den Quittierungsalgorithmus notwendig ist⁵⁸. Die Benutzerschnittstelle wird vorerst in Software nachgebildet. Es handelt sich dabei neben dem Start-, Stop- und Resettaster auch um den Schalter zur Aktivierung des regenerativen Bremssystems und um den TSMS bzw. GLVMS. Für

⁵⁸ Das AMS gehört genau genommen auch zum *shutdown circuit*, wird aber wie beschrieben über die CAN-Schnittstelle eingebunden. Dies gilt ebenfalls für das im AMS integrierte IMD.

den sicheren Betrieb ist weiterhin die Weitergabe eines Fehlers der Kühlung durch den Algorithmus des Kühlsystems notwendig.

Der Algorithmus bestimmt aus den genannten Sensoren bzw. Nachrichten den gewünschten Systemzustand des Antriebes, seines DCDC-Wandlers und des AMS. Weiterhin legt er die Spannung des DCDC-Wandlers und das vom Antrieb gewünschte Sollmoment fest. Bei Verwendung des Algorithmus in der VCU erfolgt die Zuordnung der Ausgangsgrößen direkt zu den entsprechenden CAN-Botschaften. Wird der Algorithmus am Teststand mittels CAN-Adapter verwendet, erfolgt diese Zuordnung nicht direkt, da die übergeordnete Teststandsteuerung in der Lage sein muss den Antrieb sicher herunterzufahren bzw. abzuschalten.

5.4.2.2 Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug

Das Rennfahrzeug muss je nach Situation in verschiedene Betriebsmodi versetzt werden. Zur Abbildung dieser Modi eignet sich eine Zustandsmaschine. Zur besseren Übersicht wird diese in kleinere Zustandsmaschinen unterteilt, die miteinander kommunizieren. Dies ist neben dem *Fahrmodus*, die Steuerung des *DCDC-Wandlers* im Antrieb und die *Fehlerbehandlung* der VCU.

Fahrmodus In Abbildung 5.18 auf der nächsten Seite erfolgt die Darstellung der übergeordneten Ebene der für den Fahrmodus des Fahrzeuges verwendeten Zustandsmaschine. Im Startzustand *Stop* wird das TS deaktiviert. Dies stellt den sicheren Zustand dar, in der die Maschine weder fähig ist, ein Drehmoment abzugeben, noch das vom System die Gefahr eines elektrischen Schlages besteht. Bei Auftreten eines Fehlers des TS erfolgt ein Übergang in diesen Zustand, egal in welchem Zustand sich der Antrieb vorher befindet. Dieser erfolgt mit einer zeitlichen Verzögerung, die ein Herunterfahren des Antriebes ermöglicht. Im Zustand *Bereitschaft* wird das TS aktiviert, eine Aktivierung des Antriebes erfolgt noch nicht. Das Aktivieren des TS wird durch das TSAL angezeigt. Dies wird vom TS allerdings direkt, ohne Umwege über die VCU, angesteuert, weshalb es hier auch keine Berücksichtigung findet. Eine Aktivierung dieses Betriebsmodus ist nur möglich, wenn kein kritischer Fehler registriert wurde und das GLVS aktiv ist bzw. wenn der TSMS aktiviert wurde. Dem Reglement entsprechend erfolgt die Abschaltung des TS durch den *shutdown circuit*, wenn der GLVMS bzw. TSMS deaktiviert wird⁵⁹. Um nach erneutem Deaktivieren eine sofortige Betriebsbereitschaft zu verhindern, erfolgt gleichzeitig eine Rückkehr in den Zustand *Stop*⁶⁰. Liegt kein Fehler im Antrieb vor und betätigt der Fahrer den Starttaster zusammen mit dem Bremspedal bei aktivierter Zündung erfolgt ein Übergang in den Modus *Fahrzeug_Betrieb* bei ebenfalls

⁵⁹ Der TSMS gibt zwar die Steuerspannung für die AIRs über das AMS frei und ist damit fähig das System direkt abzuschalten. Das Aktivieren des TS erfolgt aber durch das AMS und muss durch die VCU initiiert werden.

⁶⁰ Ein Auslösen des *shutdown circuit* erzeugt das Ereignis *Fehler_TS*.

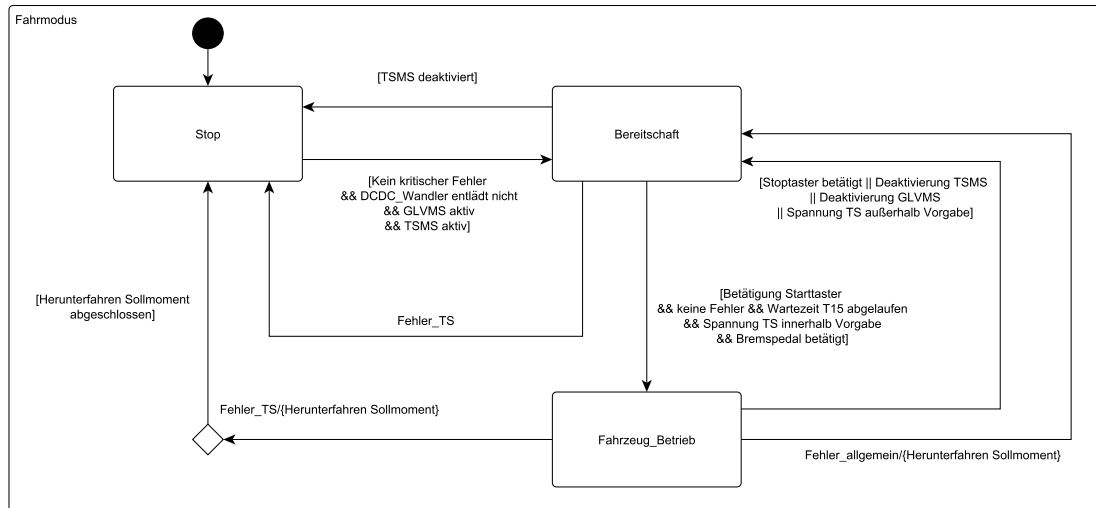


Abbildung 5.18: UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Übergeordnete Ebene

aktivem TS. Dabei muss die Wartezeit von 500ms beachtet werden, die seit Aktivieren des GLVS vergangen sein muss. Nur in diesem Zustand reagiert der Antrieb auf eine Drehmomentvorgabe durch den *torque encoder*, was die VCU durch die Aktivierung des sogenannten *Ready-To-Drive-Sound* an in der Nähe stehende Personen meldet⁶¹. Der Stoptaster hat die Funktion, den Antrieb auf den Wunsch des Fahrers hin wieder zu deaktivieren. Er verhindert somit, dass der Antrieb auf eine unbeabsichtigte Drehmomentanforderung des Fahrers reagiert, was durch die Rückkehr in den Zustand *Bereitschaft* erfolgt. Ein Fehler des *torque encoders* verursacht ebenfalls einen Übergang in diesen Zustand, da laut Reglement kein Deaktivieren des TS nötig ist. Tritt im Antrieb ein Fehler des TS auf, erfolgt ein Übergang in den Zustand *Stop*.

Die einzelnen Zustände des Fahrmodus müssen noch weiter unterteilt werden. Geht das System in den in Abbildung 5.19 auf der nächsten Seite dargestellten Zustand *Stop*, wird nach einer Wartezeit von 20ms das TS deaktiviert. Dies ist in der Anfahrprozedur des Antriebes so vorgeschrieben. Nach erfolgreichem Abtrennen des TS kann der Zwischenkreis entladen werden. Dies erfolgt durch das Event *TS_Entladen*, was an den DCDC-Wandler gesendet wird. Ein Absinken der Spannung unter 40V signalisiert ein erfolgreiches Entladen des Zwischenkreises. Wird hingegen der in Abbildung 5.20 auf der nächsten Seite dargestellte Zustand *Bereitschaft* aktiviert, wird über das AMS das TS aktiviert. Ein Ansteuern der Vorladeschütze wird vom AMS automatisiert vorgenommen. Erfolgt eine positive Rückmeldung vom AMS, ist das TS hiermit aktiv. Das Erreichen dieses Zustandes ist Grundvoraussetzung für den Start des Fahrzeuges. Der in Abbildung 5.21 auf Seite 72 dargestellte Zustand *Fahrzeug_Betrieb* wird ebenfalls weiter unterteilt. Die Betriebsmodi *Fahrt* und *Rekuperation* werden parallel abgearbeitet, da das Fahrzeug auch ohne Rekuperation fahrbar sein muss. Im Betriebsmodus *Fahrt* erfolgt eine Sperrung des Sollmomentes, sobald beide Pedale gleichzeitig mit dem in

⁶¹ Dieser stellt einen zwischen einer und drei Sekunden langen Warnton dar [13, EV4.13].

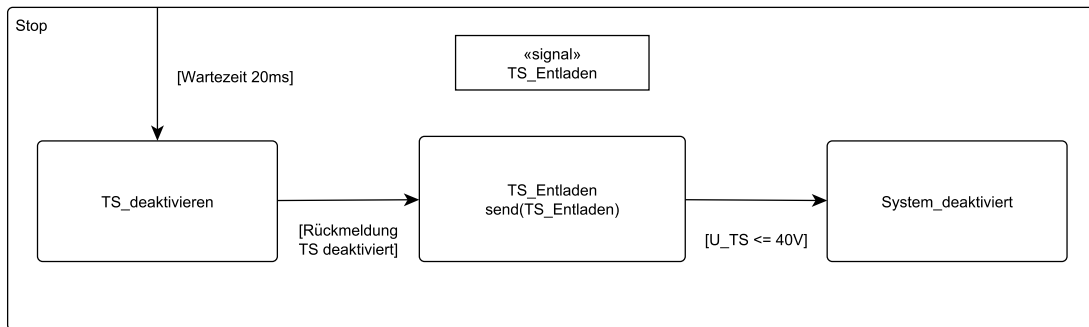


Abbildung 5.19: UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Stop

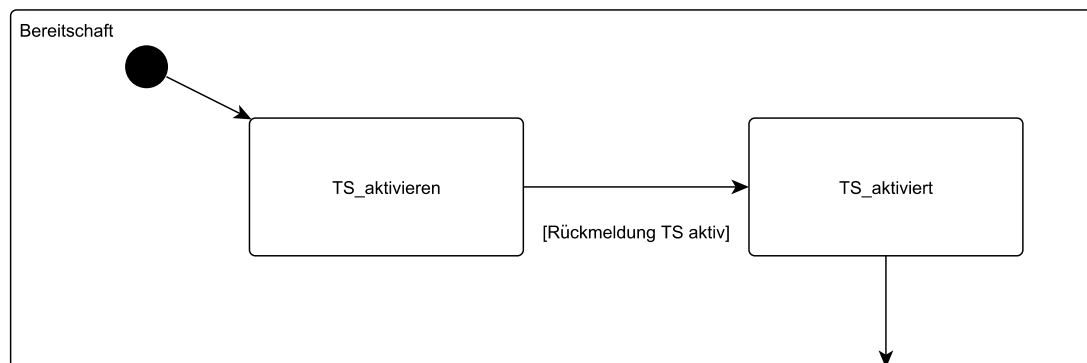


Abbildung 5.20: UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Bereitschaft

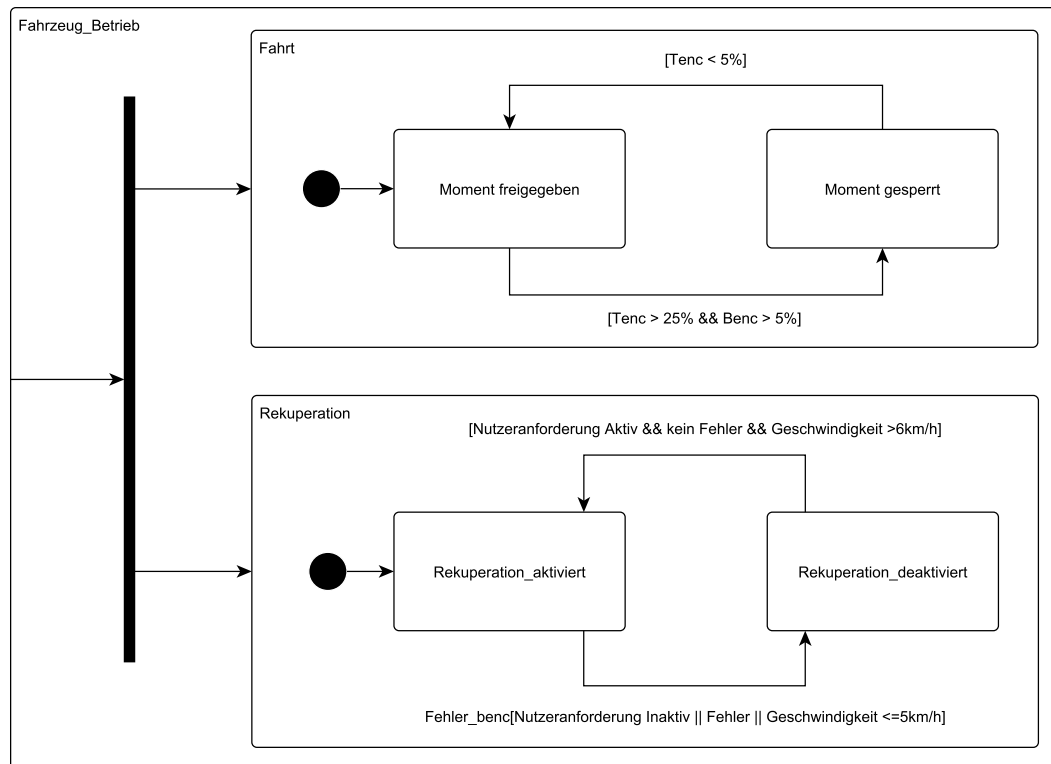


Abbildung 5.21: UML-Zustandsdiagramm VCU - Fahrbetrieb - Fahrzeug_Betrieb

Abschnitt 5.4.1.2 auf Seite 67 beschriebenen Pedalweg betätigt werden. Eine Rückkehr ist erst möglich, wenn eine Entlastung des *torque encoders* erfolgt. Die Rekuperation wird aktiviert, wenn kein Fehler im Fahrzeug existiert, die Geschwindigkeit oberhalb der in Abschnitt 5.4.1.2 auf Seite 68 beschriebenen Geschwindigkeitsgrenze liegt und der Fahrer dies wünscht bzw. dies vom Team parametrierung wurde⁶². Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt bzw. tritt das Event *Fehler_benc* auf, wird die Rekuperation deaktiviert.

Fehlerzustand Die Behandlung der Fehlerzustände im Rennfahrzeug erfolgt über eine weitere Zustandsmaschine, deren Darstellung in Abbildung 5.22 auf der nächsten Seite erfolgt. Erfolgt ein fehlerfreier Betrieb, befindet sich die Zustandsmaschine im Zustand *Normalbetrieb*, was auch den Initialzustand darstellt. Die Einteilung der Fehler erfolgt in unkritische Fehler und kritische Fehler. Unkritische Fehler sind Fehler des *torque encoders* und des Antriebes, die als allgemeine Fehler gelten bzw. Fehler des *brake encoders*. Die Weiterleitung an die Zustandsmaschine *Fahrmodus* erfolgt über die Events *Fehler_allg* und *Fehler_benc*, was dort eine Abschaltung des Antriebes verursacht. Kritische Fehler sind ein Auslösen des *shutdown circuit*, der Ausfall der Kühlung, der Ausfall

⁶² Um im Grenzbereich ein wechselndes Umschalten zu vermeiden, wurde eine Hysterese eingefügt.

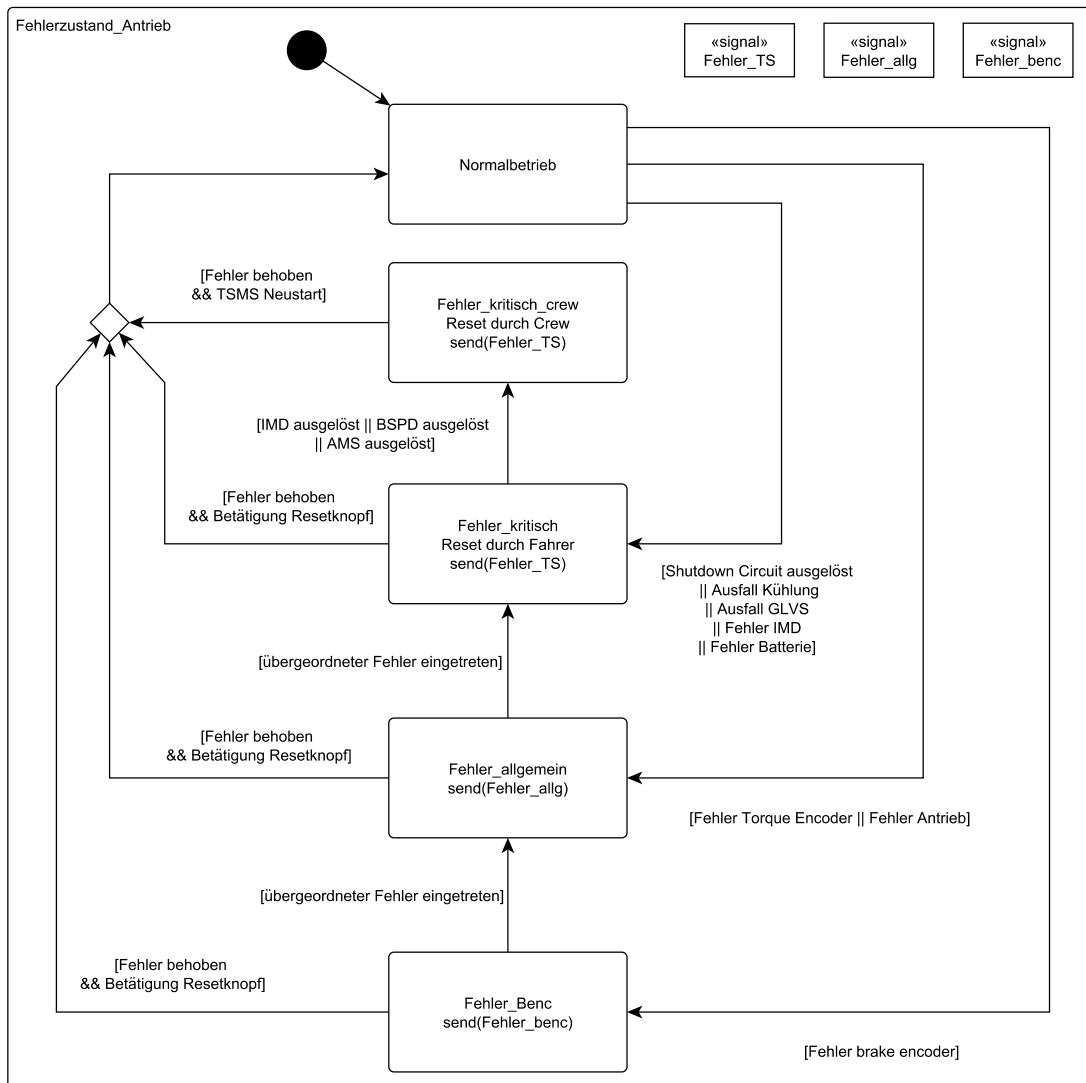


Abbildung 5.22: UML-Zustandsdiagramm VCU - Fehlerzustand_Antrieb

des GLVS und Fehler des IMD bzw. des AMS⁶³. Die Weiterleitung an die Zustandsmaschinen *Fahrmodus* und *DCDC-Wandler* erfolgt über das Event *Fehler_TS*, was dort eine Abschaltung des TS und wenn nötig vorher des Antriebes verursacht bzw. den DCDC-Wandler abschaltet. Fehler des IMD, des BSPD und des AMS dürfen laut Reglement nicht vom Fahrer zurückgestellt werden können, was durch den Übergang in den Zustand *Fehler_kritisch_crew* sichergestellt wird. Befindet sich das System in einem Fehlerzustand, verursacht das Auftreten eines niederwertigen Fehlers aus Sicherheitsgründen den Übergang in den entsprechenden höherwertigen Fehler. Ein Beheben der Fehler und die Quittierung mittels Resettaster bzw. ein Deaktivieren und anschließendes Aktivieren des TSMS setzt das System wieder in den *Normalzustand* zurück.

⁶³ Diese Komponenten lösen bei Gefahren aus, die zu schweren Personenschäden durch elektrischen Schlag oder Verbrennungen führen können.

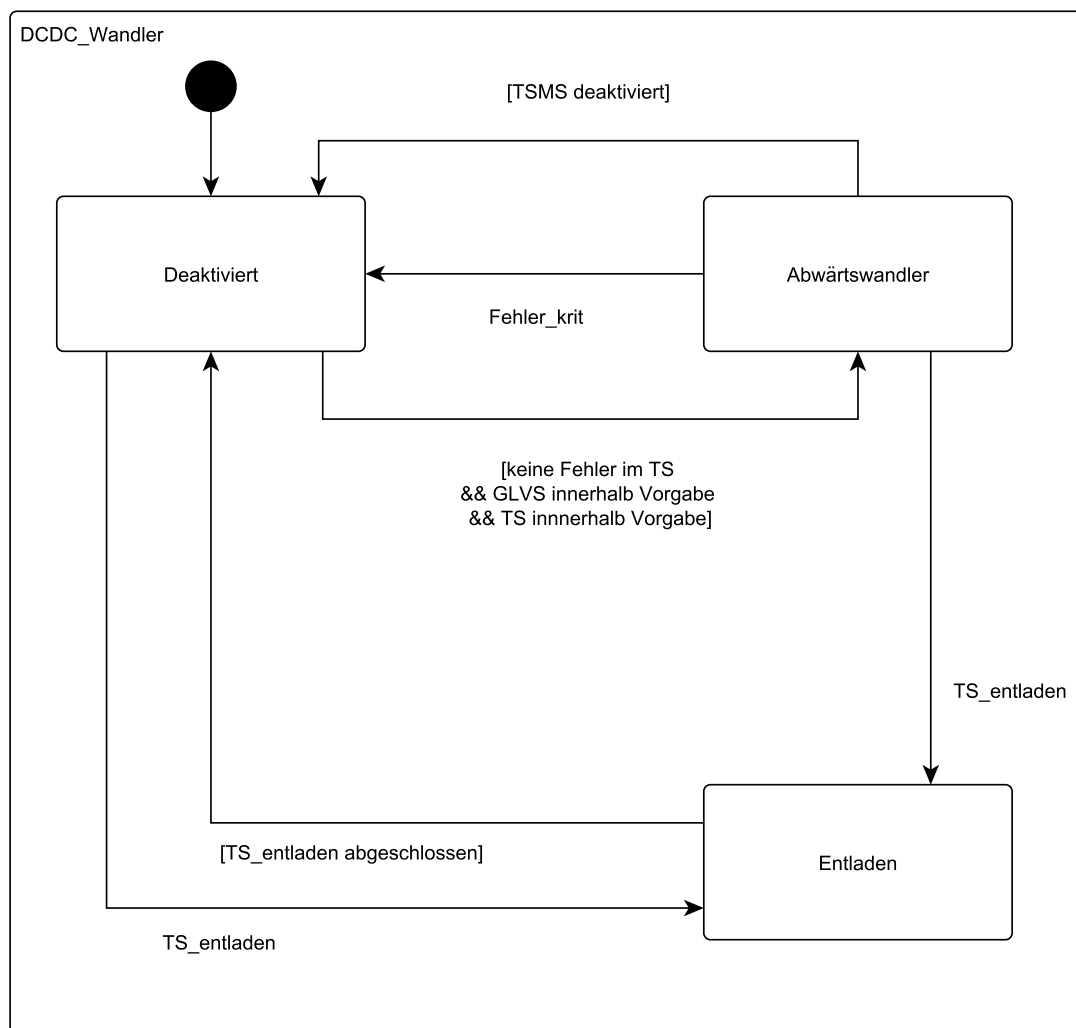


Abbildung 5.23: UML-Zustandsdiagramm VCU - DCDC

DCDC-Wandler Die Ansteuerung des im Antriebssystem integrierten DCDC-Wandlers erfolgt mittels der in Abbildung 5.23 dargestellten Zustandsmaschine. Liegen die Spannung des TS und des GLVS in einem Bereich, der dem Betriebsbereich des DCDC-Wandlers entspricht ⁶⁴, wird dieser aktiviert und kann nur durch ein Deaktivieren des TS durch den Nutzer wieder deaktiviert werden. Eine Anforderung über das Signal *TS_entladen* führt aus den Zuständen *Deaktiviert* und *Abwärtswandler* zum Entladen des TS. Sobald das Entladen des TS abgeschlossen wurde, erfolgt eine Rückkehr in den Zustand *Deaktiviert*. Dabei wird die Gefahr einer Restspannung durch die integrierten Entladewiderstände verhindert.

⁶⁴ Der Betriebsbereich des DCDC-Wandlers ist größer und schließt den Betriebsbereich des restlichen Antriebssystems mit ein.

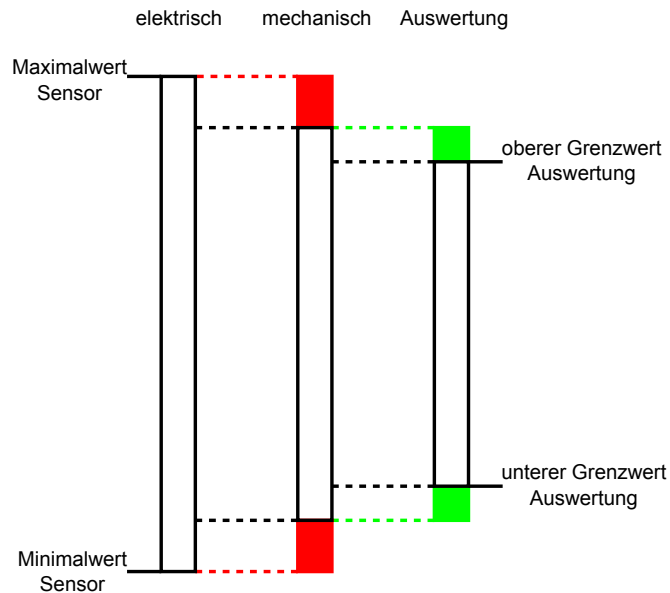


Abbildung 5.24: Wertebereich Potentiometer

5.4.2.3 Algorithmus Berechnung Stellung und Plausibilität *Encoder*

Die Pedaleinheit ist ein wichtiger Teil des Konzeptes gegen die Gefahr *Ungewolltes Beschleunigen bzw. Abbremsen des Fahrzeuges*. Durch den elektrischen Antrieb erfolgt ein schnelles und nahezu lautloses Bereitstellen eines Drehmomentes, was bei fehlerhaften Signalen der *encoder* fatale Folgen haben kann. Wie in Abschnitt 4.2.3 auf Seite 42 beschrieben wurde, muss eine Prüfung der Plausibilität und eine Normierung in der VCU erfolgen. Für den Test auf Plausibilität wird der Wertebereich der Sensoren in die in Abbildung 5.24 dargestellten Bereiche aufgeteilt.

Der aufgrund der Endanschläge mechanisch nicht erreichbare Bereich ist rot markiert. Befinden sich die Messwerte in diesem Bereich, entspricht dies einem Kurzschluss, einem Drahtbruch oder einer mechanischen Zerstörung der *encoder* bzw. Pedaleinheit, was eine Implausibilität darstellt. Um die geforderte Überwachung der maximalen Abweichung beider *torque encoder* bzw. *brake encoder* untereinander von 10 % überwachen zu können, wird jeweils einer der beiden parallel montierten Sensoren verpolt betrieben, was zu einem gegenläufigen Verhalten führt. Die Eingangswerte der Sensoren der *encoder* werden addiert, was bei korrekter Funktion den elektrischen Endwert der Sensoren ergeben muss. Eine Abweichung der addierten Eingangswerte vom theoretischen elektrischen Endwert von mehr als 10 % wird als Implausibilität betrachtet und führt zu einer Fehlermeldung.

Für die Auswertung der Sensoren in der VCU müssen diese noch normiert werden. Auf eine Korrektur des Zusammenhangs zwischen realem und gemessenem Pedalweg aufgrund der Montageposition der *encoder* wird verzichtet⁶⁵. Da im Renneinsatz nie ein

⁶⁵ Am Rennfahrzeug kann dies je nach Art der Montage der Sensoren nötig sein, um eine lineare Pedal-

exakt vollständiges Durchtreten bzw. Loslassen der Pedale erfolgt, wird zur Auswertung nur der in Abbildung 5.24 auf der vorherigen Seite grün markierte Bereich genutzt, der ein Teilbereich des mechanisch erreichbaren Bereichs darstellt. Dieser ist sehr klein, wird aber benötigt, damit die in Abschnitt 5.4.2.2 auf Seite 69 beschriebenen Algorithmen nicht zu einer Fehlauslösung führen. Die Normierung folgt dabei der Formel

$$s_{enc_{norm}} = \frac{s_{enc_{raw}} - s_u}{s_o - s_u} \quad (5.4)$$

, wobei $s_{enc_{raw}}$ dem absoluten Rohwert, $s_{enc_{norm}}$ dem normierten Weg des *encoders*, s_u der absoluten unteren Grenze der Auswertung und s_o dem absoluten oberen Grenzwert der Auswertung entspricht. Dies ergibt eine Skalierung zwischen Null und Eins.

5.4.2.4 Algorithmus Drehmomentbereitstellung

Für die Berechnung des Sollmomentes der Maschine stellt die Anforderung des Fahrers mittels *torque* bzw. *brake encoder* den Maximalwert dar. Dabei wird das Signal des *brake encoders* bevorzugt behandelt. Das Betätigen der Bremse hat also höhere Priorität, solange der Pedalweg des *torque encoders* den in Abschnitt 5.4.1.2 auf Seite 67 genannten Grenzwert nicht übersteigt. In diesem Fall darf kein Sollmoment an den Antrieb geliefert werden. Durch das bei Rennfahrern übliche Bremsen mit dem linken Fuß wird der Fall der gleichzeitigen Betätigung durchaus häufig vorkommen. Im Fehlerfall muss weiterhin ein abruptes Herunterfahren des Momentes verhindert werden.

Damit der Fahrer des Fahrzeuges eine seinen Erwartungen entsprechende Rückmeldung erhält, gilt nach [15, Seite 106]: „Das effektive Motormoment soll linear vom Fahrpedalweg abhängig sein.“. Durch die Sollmomentvorgabe an den Antrieb ergibt das eine direkte Umsetzung des normierten Signals des *torque encoders* in dieses Sollmoment, solange keine Betätigung der Bremse erfolgt. Die Behandlung der Umsetzung des *brake encoders* in ein Sollmoment erfolgt in Abschnitt 5.4.2.6 auf Seite 78.

Unter bestimmten Bedingungen muss das von den *encodern* vorgegebene Sollmoment vor Übergabe an die Maschine jedoch verringert werden. Diese sind unter anderem:

- Thermische Überlastung des Antriebes ⁶⁶
- Thermische Überlastung anderer Komponenten wie des Akkumulators
- Begrenzung im Rekuperationsbetrieb
- Fahrdynamikregelung im Längsbetrieb ⁶⁷
- Maximaler Leistungsbezug von 80 kW aus dem Akkumulator

kennlinie zu erhalten.

⁶⁶ Dies ist neben unzureichender Kühlung auch durch Übergang des Antriebes in den Bereich der Dauerleistung möglich.

⁶⁷ Eine Fahrdynamikregelung im Querbetrieb ist in der Anordnung mit nur einem elektrischen Antrieb so nicht möglich.

Die thermische Überlastung des Antriebes wird durch interne Sicherheitsmechanismen verhindert, muss also nicht berücksichtigt werden. Die Überhitzung anderer Komponenten des Antriebssystems ist nicht Thema dieser Arbeit. Eine Drehmomentbegrenzung des vom *brake encoder* vorgegebenen Bremsmomentes wird im Abschnitt 5.4.2.6 auf der nächsten Seite behandelt. Eine Fahrdynamikregelung in Form einer Antriebs-schlupfregelung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, sollte aber im Rennfahrzeug implementiert werden, da dies deutliche Vorteile in allen Wettbewerben hat. Die Begrenzung des maximalen Leistungsbezuges erfolgt im folgenden Abschnitt 5.4.2.5.

5.4.2.5 Algorithmus Leistungsbegrenzung

Die aus Abschnitt 5.4.1 auf Seite 64 bekannte Begrenzung der maximalen Leistung kann auf mehrere Arten erfolgen. Grundsätzlich wird vom Antrieb bzw. AMS der Strom und die Gesamtspannung gemessen und ist so in der VCU verfügbar ⁶⁸. Der Hersteller des Antriebes empfiehlt allerdings zur Begrenzung nicht die internen Strom- bzw. Leistungsgrenzen zu nutzen, da diese zum Schutz des Akkumulators dienen ⁶⁹. Vielmehr soll eine Begrenzung durch das Sollmoment erfolgen. Die Berechnung der vom Antrieb maximal bereitzustellenden Momentanleistung berechnet sich zu $P_{abgrenz} = P_{zu grenz} \cdot \eta_{Antrieb}$, wobei für den Betrieb des DCDC-Wandlers die durch das Reglement vorgegebene Grenze nicht exakt ausgenutzt werden sollte. Über die Gleichung

$$M_{Sollgrenz} = \frac{P_{abgrenz}}{\omega} = \frac{P_{zu grenz} \cdot \eta_{Antrieb}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (5.5)$$

kann dann das jeweilige Maximalmoment, das der Antrieb stellen darf, aus der aktuellen Drehzahl des Antriebes $n \left[\frac{1}{s} \right]$ bestimmt werden. Problematisch ist hierbei die Bestimmung des Wirkungsgrades des Antriebes, der vom Istmoment, der Drehzahl und der Systemspannung abhängig ist. Hierfür ist die Aufnahme eines Kennlinienfeldes nötig, da der Wirkungsgrad des Inverters in der TKU nur für einige im Serieneinsatz wichtige Punkte geringerer Leistung bei Nennspannung angegeben ist. Eine Aufnahme dieses Kennlinienfeldes erscheint sehr aufwendig. Eine Begrenzung des Testaufwandes ist jedoch möglich. Er beschränkt sich aufgrund des bis zur Nenndrehzahl konstanten Maximalmomentes und einer damit linear mit der Drehzahl ansteigenden Leistung auf den mittleren Drehzahlbereich. Im höheren Drehzahlbereich sinkt die Drehzahl ab, wodurch dort die Grenzleistung ebenfalls nicht erreicht wird. Problematisch ist eher die Abhängigkeit von der Akkumulatorspannung. Der Antrieb erreicht die Grenzleistung über einen

⁶⁸ Die Messung durch das AMS ist als günstiger anzusehen, da durch den zwar geringen, aber vorhandenen Spannungsfall der Leitung, am Inverter eine zu geringe Leistung gemessen wird, zumal die Auflösung der vom AMS an die VCU gesendeten Messwerte höher ist. Weiterhin misst der Inverter die Stromentnahme aus dem Zwischenkreiskondensator, die vom aus dem Akkumulator entnommenen Strom abweicht.

⁶⁹ Der Grenzstrom I_{grenz} könnte leicht über die Grenzleistung $P_{zu grenz} = 80 kW$ und der aktuellen Spannung berechnet und dem Inverter mitgeteilt werden. Hierbei müsste nur die Reaktionszeit des Antriebes und der Kommunikation berücksichtigt werden. Die interne Reaktionszeit des Antriebes auf eine Änderung des Grenzwertes per CAN-Nachricht ist allerdings unklar.

weiten Spannungsbereich, was den Zeitaufwand für die Ermittlung des Feldes erhöht.

Aufgrund der im Abschnitt 3.3.3 auf Seite 34 genannten Einschränkungen ist die Aufnahme des Kennlinienfeldes am Teststand nicht möglich und muss somit am Rennfahrzeug selbst ermittelt werden. Für den Testbetrieb wird vorerst ein Wirkungsgrad von $\eta_{Antrieb} = 0,9$ angenommen. Dieser kann später einfach geändert bzw. durch ein Kennlinienfeld ersetzt werden.

5.4.2.6 Algorithmus Begrenzung Rekuperation

Die Rekuperation, also das regenerative Bremsen des Rennfahrzeuges, kann einerseits bei Betätigung des *brake encoders* und andererseits auch beim Zurücknehmen einer Drehmomentanforderung per *torque encoder* einsetzen. Im Falle des *torque encoders* müsste die Rekuperation einsetzen, sobald mit dem Pedal das Haltemoment, dass für eine gleichförmige Bewegung erforderlich wäre, unterschritten wird. Da im Rennfahrzeug der Antrieb möglichst vollständig im Vollastbereich betrieben wird und der Bremsvorgang so kurz wie möglich ist, wird der Zeitraum, in dem Schubbetrieb vorherrscht ohne den *brake encoder* zu betätigen, als sehr gering eingeschätzt. Aus diesem Grund und um die Komplexität des Systems bei dem ersten Elektrorennfahrzeug des Teams gering zu halten, wird darauf verzichtet und die Rekuperation nur bei aktivem Bremsen des Fahrers implementiert.

Ist die mechanische Bremse vom Fahrer durch ein brakebywire-System entkoppelt, ist es möglich das Bremsmoment anhand des Fahrerwunsches variabel zwischen elektrischem Antrieb und mechanischer Bremse zu verteilen [7, Seite 130]. Dies hat neben dem höheren Potential der Energierückgewinnung und der Abbremsung nahe des Optimums den Vorteil, dass bei Ausfallen der Rekuperation durch beispielsweise thermische Überlastung des Akkumulators das fehlende Moment durch die mechanische Bremse aufgebracht werden kann, ohne das der Fahrer dies bemerkt bzw. eingreifen muss. Da laut Reglement [13, T 7.1.4] ein solches System nicht erlaubt ist, muss der Fahrer im Falle des Systemausfalls den *brake encoder* stärker betätigen, sodass die Abbremsung einen Wert annimmt, der die mechanische Bremse der Hinterachse aktiviert ⁷⁰.

Um einen Algorithmus für das Rekuperationsmoment bei stabiler Abbremsung zu entwickeln, ist als Erstes die ideale Bremskraftverteilung nach Gleichung 2.15 auf Seite 9 zu bestimmen und auf die Gewichtskraft des Fahrzeuges F_G zu beziehen. Dazu werden die Kennwerte des Vorjahresfahrzeuges aus Tabelle 5.5 auf der nächsten Seite genutzt, da die Entwicklung des zukünftigen Fahrzeuges noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Der Radstand ist direkt verfügbar, wogegen die horizontalen Abstände des Schwerpunktes aus der statischen Achslast berechnet und die Höhe des Schwerpunktes abgeschätzt wurden. Der Beladungszustand eines Rennfahrzeuges ändert sich nur

⁷⁰ Für diesen Fall sollte eine Warnleuchte im Cockpit installiert werden, die den Fahrer bei Ausfall der Rekuperation warnt.

Radstand l	Abstand Schwerpunkt Vorderachse l_{S_V}	Abstand Schwerpunkt Vorderachse l_{S_H}	Schwerpunkthöhe h_S	Fahrzeugmasse inklusive Fahrer m
1530 mm	703,8 mm	826,2 mm	340 mm	330 kg

Tabelle 5.5: Kennwerte für Algorithmus Rekuperation

in engen, vernachlässigbaren Grenzen⁷¹. Um die Berechnungen zu vereinfachen, wurde eine feste Bremskraftverteilung angenommen. Eine abgeknickte Verteilung würde aber durch die bei mittleren Abbremsungen mögliche höhere Hinterachsbremskraft eine bessere Ausnutzung der Bremsenergie zur Folge haben. Nach [9, Seite 204] wird für zweiachsige Personenkraftfahrzeuge eine stabile Bremsung bis $z = 0,8$ gefordert. Dies führt für maximale Hinterachsbremskraft und damit nutzbarer Rekuperationsenergie zu einem Schnittpunkt mit der idealen Kennlinie bei $z = 0,8$, da eine feste Verteilung unterhalb der idealen Kennlinie stabiles Bremsverhalten zur Folge hat. Dies wurde bereits in Abschnitt 2.1.3 auf Seite 8 besprochen. Das für die Auslegung benötigte Verhältnis i_B berechnet sich nach genannter Bedingung zu

$$i = \frac{l_{S_V}}{l} - \frac{h}{l} \cdot \mu_h^* \quad (5.6)$$

, wobei der Kraftschluss $\mu_h^* = z^*$ der Abbremsung an dieser Stelle $z^* = 0,8$ entspricht und sich Vorder- und Hinterachse gleichzeitig an der Haftgrenze befinden [9, Seite 218]. Am Rennfahrzeug ergibt sich damit ein Bremskraftverhältnis von

$$i_B = \frac{703,8 \text{ mm}}{1530 \text{ mm}} - \frac{340 \text{ mm}}{1530 \text{ mm}} \cdot 0,8 = 0,2822$$

. Die berechnete ideale wird zusammen mit der realen Bremskraftverteilung in Abbildung 5.25 auf der nächsten Seite in der aus Abbildung 2.1 auf Seite 9 bekannten Darstellungsweise gezeigt. Für eine größtmögliche Ausnutzung der Rekuperationsenergie ist es nötig, die Kennlinie der mechanischen Bremse zu verändern. Der Bremsdruck an der Hinterachse muss für kleine Abbremsungen verzögert werden, sodass in diesem Bereich zusammen mit der regenerativen Bremse nur die mechanische Vorderbremse aktiviert wird. Erst bei größerer Abbremsung soll die mechanische Bremse an der Hinterachse ansprechen. Ein vollständiges regeneratives Bremsen in den ersten 90% des Pedalweges des *brake encoders*, wie es das Regelwerk erlaubt, ist allerdings bei Ausfall der regenerativen Bremse kritisch, da dies den Fahrer verunsichern kann. Aus diesem Grund sollte in diesem Bereich die mechanische Bremse zumindest etwas ansprechen.

Das in Abschnitt 2.1.3 auf Seite 8 besprochene lineare Verhältnis von Abbremsung zu Pedalweg führt zur Festlegung, dass der gemessene, auf Eins normierte, Pedalweg des *torque encoders* mit der Abbremsung z gleichgesetzt werden kann. Mit $M = F \cdot r$ und

⁷¹ Die einzige Änderung, der die Gesamtmasse unterliegt, ist die unterschiedliche Masse des jeweiligen Fahrers. Dies kann aber vernachlässigt werden.

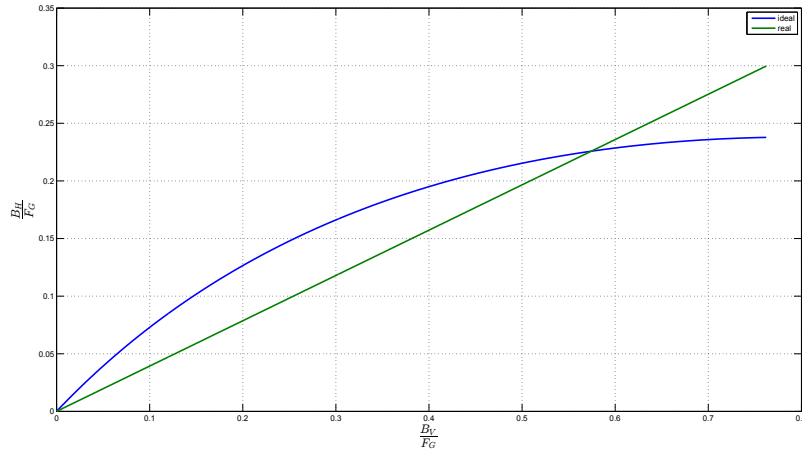


Abbildung 5.25: Bremskraftverteilung am Rennfahrzeug ideal-real

den Gleichungen 2.16 auf Seite 10 und 2.6 auf Seite 6 ergibt sich das auf die Antriebsseite bezogene Bremsmoment der Hinterachse ohne Berücksichtigung des Getriebewiderstandes zu

$$M_{H_{ers}} = \frac{B_H \cdot r}{i_G} = \frac{i_B \cdot F_G \cdot r_{Rad}}{i_G} \cdot z \quad (5.7)$$

als lineare Abhängigkeit zur Pedalstellung des *brake encoders*. Steht die Auslegung bzw. Art der Realisierung der mechanischen Bremse fest, muss diese Bremskraft von der berechneten Bremskraft subtrahiert werden, um das reale regenerative Bremsmoment der Hinterachse zu erhalten, welches dann nicht mehr linear zur Pedalstellung ist⁷². Dies ist nötig um ein Überbremsen der Hinterachse durch das sonst zu hohe Bremsmoment zu verhindern. Da der Entwicklungsstand des Rennfahrzeuges noch keine Beurteilung der Art der Realisierung der mechanischen Bremse erlaubt, erfolgt in dieser Arbeit keine Berücksichtigung der mechanischen Hinterachs-bremskraft. Die Gleichung des Bremsmomentes wird somit direkt als Sollmoment im Rekuperationsfall genutzt. Es ergibt sich für $z = 1$ ein maximales Bremsmoment von

$$M_{H_{ers-max}} = \frac{0,2822 \cdot 330 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,25 \text{ m}}{6} \cdot 1 \approx 38,1 \text{ Nm}$$

bei vollständig betätigtem *brake encoder*.

Die Rekuperation wird weiterhin von der Abhängigkeit des Ladestromes des Akkumulators vom Ladezustand (SOC) bestimmt. Ob diese Kennlinie in der VCU implementiert werden muss oder ob das AMS direkt den aktuellen maximalen Ladestrom zur Parametrierung des Antriebes zur Verfügung stellt, ist zum jetzigen Stand des Projektes noch nicht klar. Diese Begrenzung ist allerdings auch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Weiterhin ist das maximale Rekuperationsmoment vom maximalen Rekuperationsstrom des Antriebes abhängig. Da der Antrieb einen maximalen Gleichstrom von 195A zurück-

⁷² Es ergibt sich dann eine abgeknickte Bremskraftverteilung für das regenerative Bremsmoment.

speisen kann und das Fahrzeug aufgrund des durch den Hinterradantrieb reduzierten maximalen Bremsmomentes nur ein begrenztes Rekuperationspotential besitzt, wird diese Grenze nicht erreicht.

5.4.2.7 Priorisierung der Tasks

Die Berechnung des Sollmomentes und des Betriebszustandes des Fahrzeuges inklusive der Ansteuerung des AMS ist der am höchsten priorisierte Task, aufgrund seiner Bedeutung für die Gefahr des *elektrischen Schlages durch das TS* und der Gefahr des *ungewollten Beschleunigens bzw. Abbremsens des Fahrzeuges*. Diesem Task wird der Höchstwert 150 zugewiesen⁷³. Andere Tasks der VCU müssen sich diesen Funktionen dementsprechend unterordnen. Eine Einordnung dieser anderen Tasks ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und zum jetzigen Projektzeitpunkt auch nicht möglich, ist aber durch die Verwendung der VCU in Verbindung mit ETAS INTECRIO einfach zu implementieren.

Die Kommunikation mit den betreffenden Komponenten besitzt dementsprechend ebenso eine hohe Priorität. Dabei muss zwischen Nachrichten unterschieden werden, die Sollwerte bzw. Steuerbefehle übermitteln und Nachrichten, die zeitunkritische Parametrierungen enthalten. Ebenso existieren Nachrichten mit zeitkritischen Messwerten bzw. Statusrückmeldungen und Nachrichten, die unwichtige bzw. nicht verwendete Messwerte enthalten. Nachrichten zur Parametrierung des Antriebes, die konstant sind und Fehleralgorithmen enthalten, können nicht direkt in INTECRIO initialisiert werden, da der Antrieb ohne die Fehleralgorithmen in den Fehlerstatus gehen würde. Aufgrund dessen erhalten diese je nach Priorität ein eigenes Modell, die als C-Code in Intecrio integriert werden. Diesen Tasks kann dann wieder die entsprechende Priorität der Nachricht zugewiesen werden.

Die relevanten Nachrichten, ihre Priorität und eine kurze Begründung der Einordnung befinden sich aus Übersichtsgründen im Anhang C auf Seite 115. Diese werden entsprechend ihrer Priorität zusammengefasst. Eine Einordnung der Kommunikation zwischen AMS und VCU kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erfolgen, da diese nur in ihren Grundzügen bekannt ist. Ihre Einordnung erfolgt deswegen vorerst mit der höchsten Priorität.

5.4.3 Implementierung der Steuergerätesoftware auf der VCU bzw. dem PC

Das Modell der Software der VCU ist in Abbildung 5.26 auf Seite 83 zu sehen. Die einzelnen blau markierten Module werden in den folgenden Abschnitten näher beschrie-

⁷³ Die Priorität Eins entspricht in INTECRIO der geringsten Priorität.

ben. Das Modell selbst wird oberhalb dieser Ebene durch die Blöcke der ETAS-Bibliothek bzw. CANOE-Bibliothek an die CAN-Hardware angebunden. Das Modell nutzt diese CAN-Botschaften direkt zur Berechnung. Komponenten, die am Teststand in Zukunft über die I/O-Hardware ETAS ES930 angebunden werden sollen bzw. am Fahrzeug durch einen CAN-Knoten zur Verfügung stehen, werden mit Softwareschaltern verbunden. Diese können zum Testen der Funktionen innerhalb der Zielhardware verändert werden. Erfolgt die Ausführung des Modells auf dem PC mittels CAN-Adapter, werden die Ausgänge des Modells innerhalb der Software der Teststandssteuerung den CAN-Nachrichten zugeordnet. Erfolgt die Ausführung des Modells direkt auf der VCU, steuern die Ausgänge des Modells die CAN-Nachrichtenblöcke direkt an.

5.4.3.1 Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug

Die Implementierung dieses Algorithmus erfolgt in den Modulen *Shutdown*, *Deaktivierung Rekuperation* und der *Zustandsmaschine Betriebsmodus*.

Das Modul *Shutdown*, welches in Abbildung 5.27 auf Seite 84 dargestellt wird, ist für das Herunterfahren des Sollmomentes zuständig, sobald die Zustandsmaschine den Befehl dazu gegeben hat. Bei Aktivierung speichert es das eingangsseitige Sollmoment und senkt es auf Null ab, sodass der Antrieb schonend heruntergefahren wird ⁷⁴.

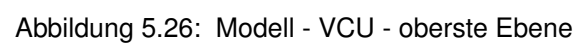
Das Modul *Deaktivierung Rekuperation* setzt das untere Grenzmoment auf Null, sobald die Zustandsmaschine die Deaktivierung der regenerativen Bremse befiehlt. Wurde die Rekuperation freigegeben, erfolgt die Festlegung des unteren Grenzmomentes auf den Wert des maximal zulässigen Bremsmomentes, welches in Abschnitt 5.4.2.6 auf Seite 78 berechnet wurde.

Das Modul *Zustandsmaschine Betriebsmodus* wurde nach den in Abschnitt 5.4.2.2 auf Seite 69 beschriebenen UML-Zustandsdiagrammen in STATEFLOW erstellt. Aufgrund des Umfangs der erstellten Zustandsmaschine und der strukturellen Übereinstimmung mit den UML-Diagrammen erfolgt an dieser Stelle keine Darstellung. Die erstellte Maschine befindet sich mit sämtlichen Ebenen in Abschnitt B auf Seite 108 des Anhangs. Die Abbildung der Zustände, Transitionen und Events bzw. Signale konnte direkt erfolgen ⁷⁵. Transitionen, die eine größere Anzahl von Elementen enthalten, wurden als *truth tables* realisiert, um die Übersichtlichkeit zu erhalten.

Durch die Zustandsmaschine werden folgende Eingänge ausgewertet, welche den entsprechenden Bedingungen im UML-Diagramm entsprechen:

⁷⁴ Der Integrator integriert solange auf, bis das eingangsseitig gespeicherte Sollmoment an seinem Ausgang erreicht wurde. Dies ist der Fall, wenn das Sollmoment am Ausgang des Moduls Null erreicht hat.

⁷⁵ Events werden dabei nicht als Broadcastevent, sondern nur an den jeweiligen Zustand gesendet, um die Rechenzeit zu optimieren.



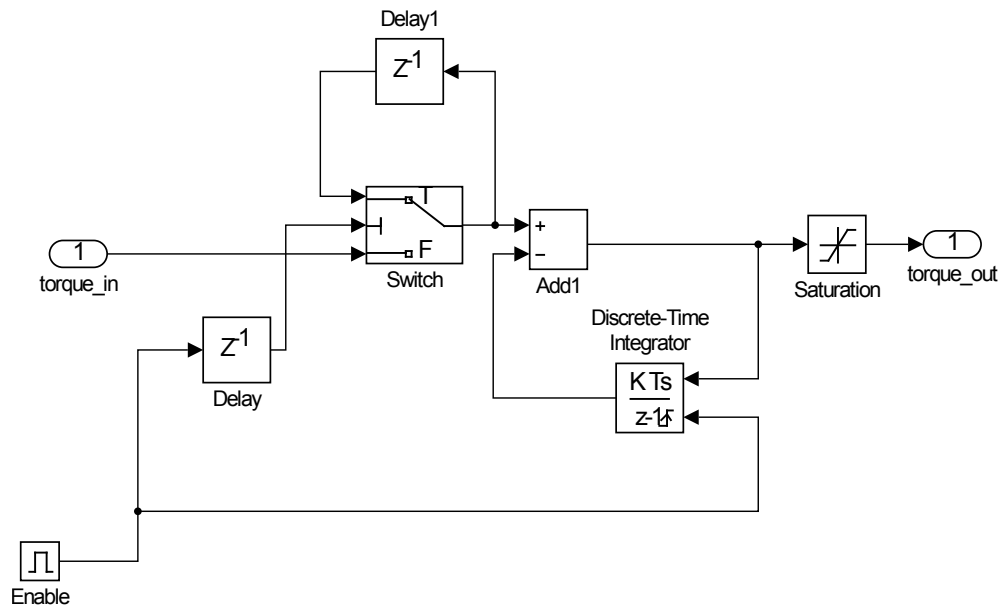


Abbildung 5.27: Modell - Shutdown Antrieb

- Als Softwareschalter Bedienpanel:
 - TSMS⁷⁶
 - GLVMS bzw. KL15
 - Normierte Signale der *Encoder*
 - Plausibilität der *Encoder*⁷⁷
 - Fehler im Kühlsystem
 - Fehler des BSPD
 - Starttaster
 - Stoptaster
 - Resettaster
 - Aktivierung Rekuperation
- Als CAN-Nachrichten
 - AMS
 - * Spannung, Strom AMS
 - * Status AMS und Status IMD - entspricht den Transitionen *Rückmeldung TS Aktiv/Inaktiv* bzw. *AMS/IMD ausgelöst*
 - Antrieb
 - * Spannung TS, Strom TS, Drehmoment, Drehzahl Antrieb

⁷⁶ Dies entspricht am Fahrzeug dem Auslösen des *shutdown circuit*.

⁷⁷ Die Auswertung des *brake encoders*, die für den Übergang in den Zustand *Fahrzeug_Betrieb* nötig ist, muss am Fahrzeug durch den Bremslichtschalter ersetzt werden, da ein Ausfall des *encoders* sonst den Ausfall des Fahrzeuges statt der Rekuperation bedeutet.

- * Status Antrieb
- DCDC-Wandler
- * Spannung GLVS, Strom GLVS
- * Status DCDC-Wandler

Die Überprüfung der Spannungsgrenzen von TS und GLVS erfolgt durch einen Intervalltest der Signale der entsprechenden Botschaften. Diese wurden der TKU des Antriebes entnommen und müssen später eventuell durch die Grenzen anderer Komponenten ersetzt werden, sollten diese einen enger begrenzten Spannungsbereich fordern.

Die Zustandsmaschine steuert folgende Ausgänge an:

- Anforderung Zustand AMS - entspricht den Zuständen *TS aktivieren/deaktivieren*
- Anforderung Zustand Antrieb - entspricht den Zuständen *Moment freigeben* bzw. *gesperrt*
- Anforderung Zustand DCDC-Wandler - entspricht den Zuständen *Deaktiviert* bzw. *Abwärtswandler/Entladen*
- Sollspannung DCDC-Wandler
- Shutdown-Befehl ⁷⁸
- Rekuperation aktiviert ⁷⁹

Für die Ansteuerung des Zustandes der Komponenten wird in der Zustandsmaschine ihr jeweiliger *enumeration-Datentyp* aus der CAN-Kommunikationsmatrix genutzt, um die Lesbarkeit zu erhöhen und spätere Anpassungen zu erleichtern. Diese können somit in der VCU direkt den CAN-Botschaften zugeordnet werden.

Das aus Abschnitt 5.4.2.2 auf Seite 69 bekannte Konzept wurde vollständig umgesetzt, mit Ausnahme der Ansteuerung des *Ready-To-Drive-Sound*. Da zum jetzigen Zeitpunkt die Kommunikationsmatrix mit dem AMS noch nicht vorhanden ist, wurden die erforderlichen Nachrichten und Datentypen aus der Kommunikationsmatrix des Antriebes entnommen. Diese müssen nach Erhalt der richtigen Matrix angepasst werden.

5.4.3.2 Algorithmus Berechnung Stellung und Plausibilität *Encoder*

Die Implementierung des Algorithmus erfolgt im Modul *Skalierung Plausibilität Encoder*. Diese wird in Abbildung 5.28 auf der nächsten Seite dargestellt. Die Prüfung auf Kurzschluss, Drahtbruch und mechanische Zerstörung erfolgt durch *Intervall-Test-Blöcke*,

⁷⁸ Dieser Ausgang steuert das Modul *shutdown* an und wird durch den Zustand *Moment freigegeben* aktiviert.

⁷⁹ Dieser Ausgang steuert das Modul *Deaktivierung Rekuperation* an und wird durch den Zustand *Rekuperation aktiviert* gesetzt bzw. rückgesetzt.

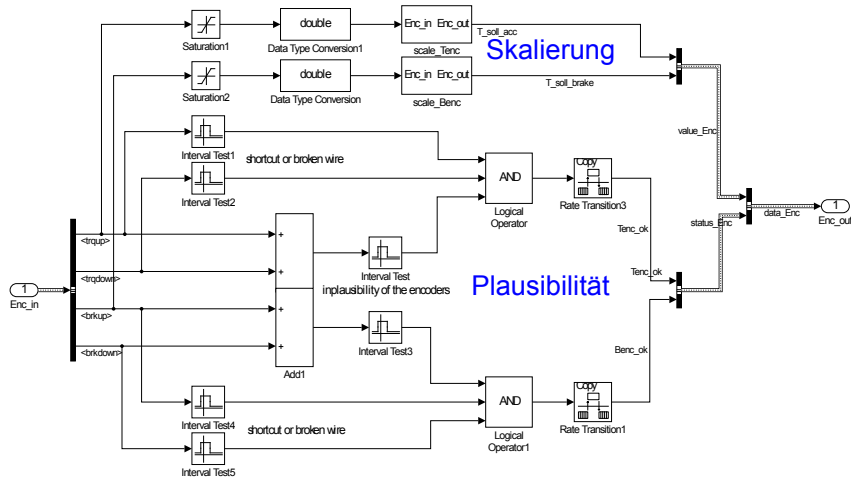
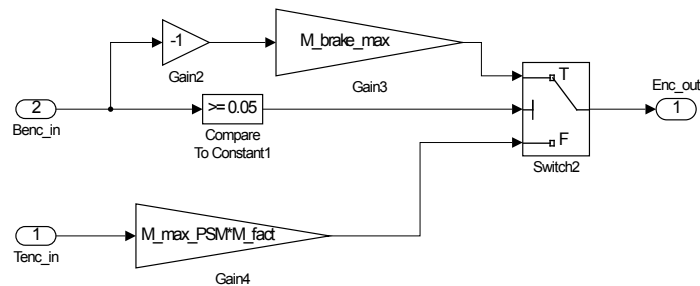
Abbildung 5.28: Modell - Berechnung Stellung und Plausibilität *Encoder*

Abbildung 5.29: Modell - Begrenzung Rekuperation

die in SIMULINK verfügbar sind. Die Abweichung der jeweils doppelt vorhandenen Sensoren wird durch Addition und anschließender Prüfung der 10 %-Grenze mittels *Intervall-Test-Blöcken* durchgeführt. Diese müssen für Plausibilität erfolgreich verlaufen und werden deshalb über eine UND-Verknüpfung kombiniert. Zur Skalierung der beiden *encoder* wird die Gleichung 5.4 auf Seite 76 direkt implementiert. Dabei wird jeweils der nicht verpolte Sensor genutzt und ausgegeben.

5.4.3.3 Algorithmus Begrenzung Rekuperation und Drehmomentbereitstellung

Die Implementierung des Algorithmus erfolgt im Modul *Begrenzung Rekuperation*. Dieser wird in Abbildung 5.29 dargestellt. Die Berechnung des aktuellen Bremsmomentes erfolgt nach Gleichung 5.7 auf Seite 80. Der skalierte Pedalweg des *brake encoder* wird dabei aufgrund des linearen Zusammenhangs mit dem im Abschnitt 5.4.2.6 auf Seite 78 berechneten Maximalwert des Bremsmomentes multipliziert. Wird das Fahrzeug nicht abgebremst erfolgt die Drehmomentberechnung, indem der auf Eins normierte Pedalweg des *torque encoders* mit dem vom Nutzer vorgegebenen Maximalmoment multipliziert wird. Um ein Sollmoment ausgeben zu können, muss die Freigabe durch die *Zustandsmaschine Betriebsmodus* erfolgen.

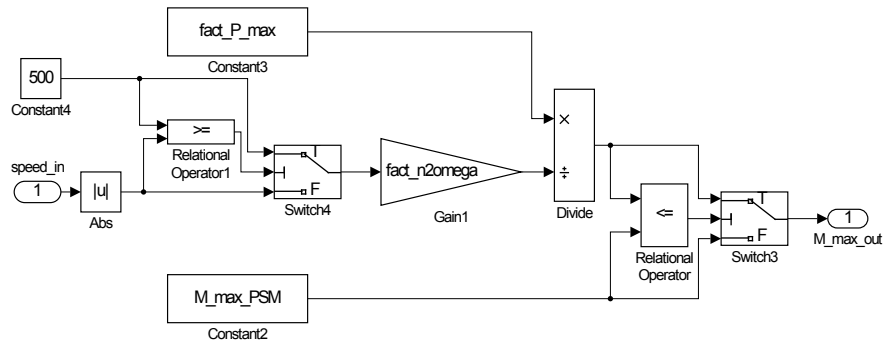


Abbildung 5.30: Modell - Leistungsbegrenzung

5.4.3.4 Algorithmus Leistungsbegrenzung

Die Implementierung dieses Algorithmus erfolgt im Modul *Leistungsbegrenzung*. Dieser wird in Abbildung 5.30 dargestellt. Oberhalb einer Minstdrehzahl berechnet dieser nach der Formel 5.5 auf Seite 77 das für die aktuelle Drehzahl gültige obere Grenzmoment, welches über einen *Saturation-Block* das Sollmoment des Antriebes begrenzt. Die Drehzahl geht als Betrag ein, da der Antrieb am Teststand verpolt angeschlossen ist und somit bei positivem Moment eine negative Drehzahl zurückgibt. Die Leistung muss dabei als abgegebene Leistung P_{ab} vorgegeben werden. Da der Nutzer des Fahrzeuges das Maximalmoment ebenfalls begrenzen kann, muss der berechnete Wert unter diesem maximalen Nutzermoment liegen.

6 Test und Verifizierung der Algorithmen

6.1 Belastungsmaschine

6.1.1 Tests am Simulationsmodell

Um den Algorithmus verifizieren zu können, erfolgt ein Vergleich anhand des in Abschnitt 5.3.4 auf Seite 61 erstellten Simulationsmodells. Das Referenzmodell enthält ein Trägheitsmodell der SIMSCAPE-Toolbox, welches somit eine physikalische Simulation einer Trägheit nutzt. Die Antriebsmaschine des Referenzmodells und das physikalische Modell der Antriebsmaschine der Trägheitssimulation werden mit dem in Abbildung 6.1 dargestellten Sollmoment beaufschlagt. Zur Überprüfung der in Abschnitt 5.3.1 auf Seite 51 genannten Anforderungen teilt sich dieses in verschiedene Abschnitte auf. Neben einem positiven konstanten Sollmoment existiert ein Bereich mit rampenförmigen Sollmoment und ein Bereich, der ein negatives konstantes regeneratives Bremsmoment vorgibt. Dabei ist die Berechnung des Strömungswiderstandes abgeschaltet, da ein Überschwingen des Reglers der Trägheitssimulation kurzzeitig eine abweichende Systemdrehzahl bzw. Strömungswiderstand zur Folge hat und das Verhalten daher nicht vergleichbar wäre.

Das Vorgeben einer Sprungfunktion führt zu starkem Überschwingen der Kreisfrequenz, wie aus Abbildung 6.2 auf Seite 90 ersichtlich wird. Dies gilt ebenso für die in Abbildung 6.3 auf Seite 90 dargestellten Momente. Das Überschwingen ist deutlich größer als durch die Parametrierung mit dem Faktor $a = 5$ zu erwarten wäre. Nach dem anfänglichen Überschwingen nähert sich die Kreisfrequenz der des Referenzmodells an und zeigt nur noch sehr geringe Abweichungen ⁸⁰. Anhand der markierten Punkte berech-

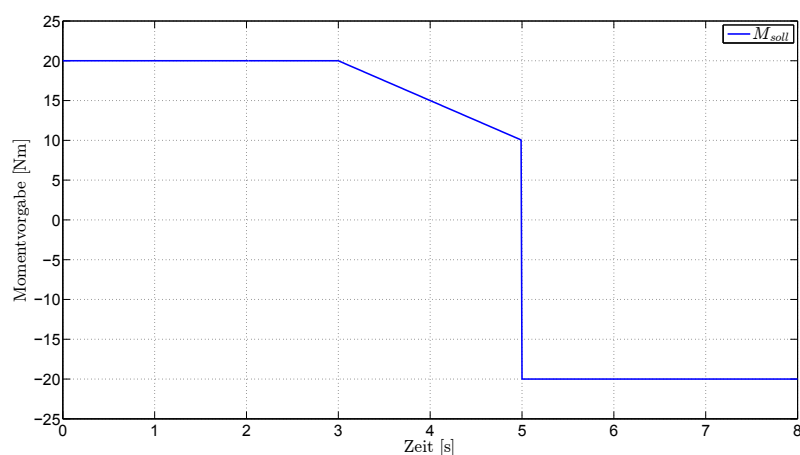


Abbildung 6.1: Test - Simulation - Sollmoment

⁸⁰ Das Pendeln um die Kreisfrequenz des Referenzmodells wird durch das auch im Modell nur ganzzahlig

net sich das Trägheitsmoment über das konstante dynamische Moment $M_{dyn} = M_{AM}$ zu

$$J = \frac{M_{dyn}}{\frac{\Delta\omega}{\Delta t}} = \frac{20 Nm}{\frac{62,47 \frac{1}{s} - 30,4 \frac{1}{s}}{1 s}} = 0,6236 kgm^2$$

. Dies entspricht nahezu dem in der Tabelle 5.2 auf Seite 46 dargestellten Trägheitsmoment des Rennfahrzeugs von $J_{Gesamt} = 0,6237 kgm^2$. Bei Vorgabe eines sprungförmigen Sollmomentes wird also wie gefordert die Trägheit des Rennfahrzeugs abgebildet.

Das Vorgeben eines rampenförmigen Sollmomentes zeigt einen Lagefehler zwischen der Kreisfrequenz des Referenzmodells und dem physikalischen Modell der Trägheitssimulation. Die Trägheit des Rennfahrzeugs wird aber trotzdem korrekt abgebildet, da die Beschleunigung mit dem Referenzmodell übereinstimmt. Das Vorgeben eines sprungförmigen Bremsmomentes zeigt das gleiche Verhalten wie im Vorwärtsbetrieb. Das Überspringen ist unter Berücksichtigung der betragsmäßig größeren Sprunghöhe von $-30 Nm$ gleich. Der zeitliche Verlauf der Annäherung an das Referenzmodell ist ebenfalls nahezu identisch. Die Trägheit des Rennfahrzeugs wird also auch im regenerativen Bremsbetrieb korrekt abgebildet. Vergleicht man generell die Trägheitssimulation zwischen der Sollwertberechnung mithilfe des Istmomentes und der Sollwertberechnung mithilfe des Sollmomentes, so bestehen nur sehr geringe Abweichungen.

Aus Übersichtsgründen und da die Simulation des Strömungswiderstandes hauptsächlich als Lastfunktion zur Begrenzung der Drehzahl am Antriebteststand konzipiert wurde, erfolgt die Darstellung des Drehzahlverlaufs im Abschnitt D auf Seite 116 des Anhangs ⁸¹.

6.1.2 Tests am Teststand

Aus dem mithilfe des Simulationsmodells verifizierten Algorithmus wird über die Codegenerierung ein auf dem PC lauffähiges Modell generiert, das am Teststand erprobt wird. Zur Sollwerterstellung wird wie am Simulationsmodell neben dem Istwert auch der Sollwert der Antriebsmaschine genutzt und verglichen. Da aufgrund der in Abschnitt 3.3.3 auf Seite 34 genannten Einschränkungen Maximalmoment und Maximaldrehzahl beschränkt sind, wird die Simulation des Strömungswiderstandes im Algorithmus aktiviert. Das berechnete Lastmoment wird mit einem Vorfaktor multipliziert, um die maximale Drehzahl auf einen unkritischen Bereich zu beschränken.

vorgebbare Sollmoment der Belastungsmaschine verursacht.

⁸¹ Um den Effekt der Drehzahlbegrenzung sichtbar zu machen und die Simulationszeit im Rahmen zu halten, wurde der Einfluss des Strömungswiderstandes über einen Vorfaktor erhöht. Der zeitliche Verlauf ist somit verkürzt dargestellt, wie auch der Endwert der Kreisfrequenz geringer ist.

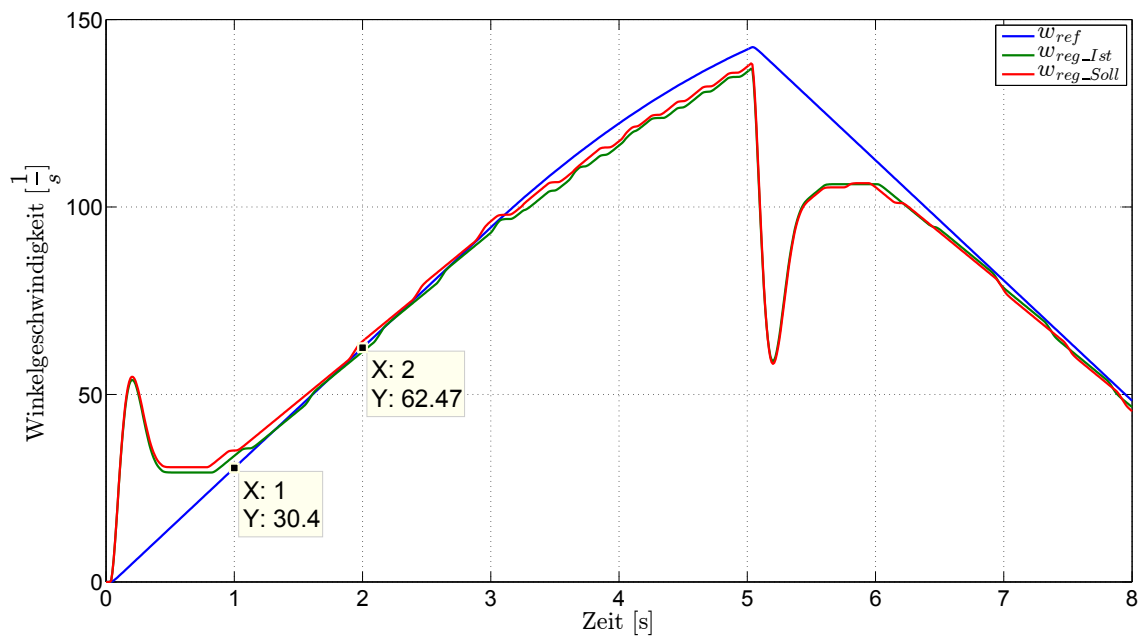


Abbildung 6.2: Test - Simulation - Kreisfrequenz Regelung ohne Last

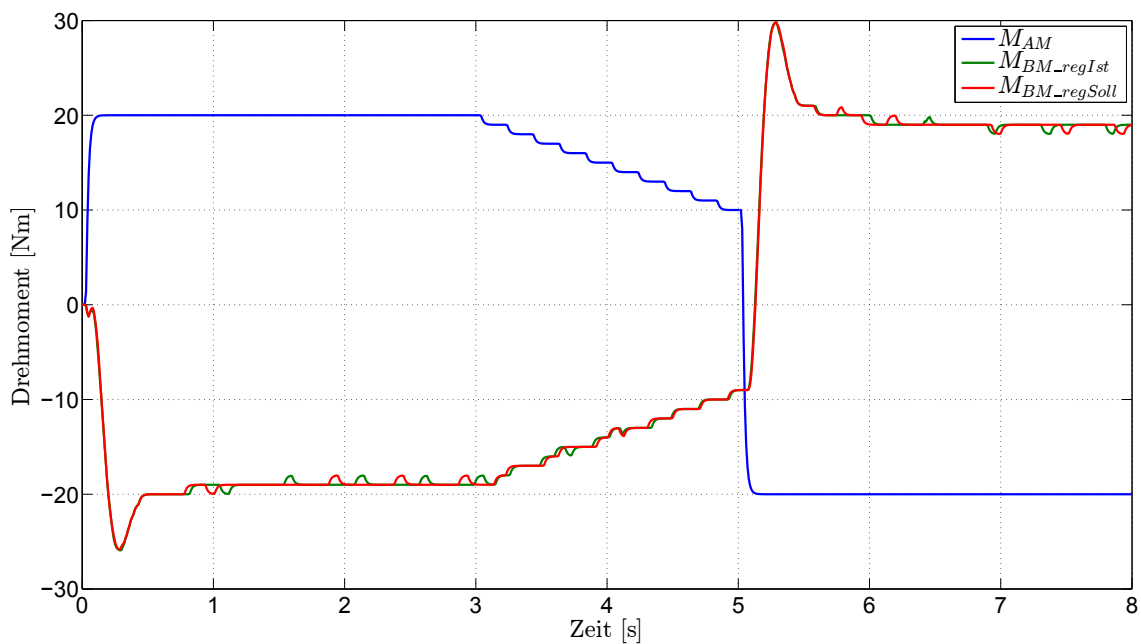


Abbildung 6.3: Test - Simulation - Drehmoment Regelung ohne Last

Bei Tests mit regenerativem Bremsmoment zeigte sich, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen der Simulation an den realen Antrieben kein Betrieb im Bereich der Rekuperation möglich ist. Die Istmomente der Antriebe zeigen ein Aufschwingen bis zum softwareseitig festgelegten Grenzmoment des Teststandes, ebenso wie die Systemdrehzahl. Auch ein Rückwärtsbetrieb der Antriebsmaschine durch Vorgabe eines negativen Sollmomentes führt zu dem Phänomen des Aufschwingens ⁸². Um das Problem zu analysieren, werden beide Antriebe mit manueller Sollwertvorgabe erprobt und die Antriebsmaschine durch die Belastungsmaschine mit einem Lastmoment beaufschlagt. Dabei wird die Richtung von Drehmoment und Drehzahl mit dem Simulationsmodell verglichen. Die Abbildung der aufgrund der elektrischen Verpolung der Antriebe jeweils negierten Drehzahl ist korrekt. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Richtung des Momentes der Antriebe im Simulationsmodell nicht korrekt abgebildet wird. Da weiterhin eine Negierung des Sollmomentes in der Software der übergeordneten Teststandsteuerung in der Simulation nicht berücksichtigt wurde, funktioniert der Algorithmus im Vorwärtsbetrieb bzw. Schubbetrieb korrekt, im Bereich der Rekuperation funktioniert der Algorithmus hingegen nicht wie erwartet. Dies stellt allerdings nur eine erste Analyse dar um das Problem einzugrenzen ⁸³. Im zeitlich begrenzten Rahmen dieser Arbeit ist eine Korrektur des Algorithmus nicht mehr möglich. Im Anschluss sollte daher eine Überarbeitung der physikalischen Simulation erfolgen, sodass eine exakte Wiedergabe der Verhältnisse am Antrieb möglich ist. Anschließend muss das Verhalten des Algorithmus der Trägheitssimulation daran erprobt und angepasst werden.

Zur Erprobung des Algorithmus im Vorwärts- bzw. Schubbetrieb erfolgt ein Drehmoment-sprung von $20Nm$ auf $30Nm$ und nach Beendigung des Einschwingvorgangs wiederum von $30Nm$ auf $20Nm$ zurück. Die Ergebnisse werden für die Sollwertberechnung aus dem Istwert der Antriebsmaschine in Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite und für die Sollwertberechnung aus dem Sollwert der Antriebsmaschine in Abbildung 6.5 auf Seite 93 dargestellt ⁸⁴. Beide zeigen im Gegensatz zu den Ergebnissen der Simulation nur geringes Überspringen und ein schnelles Anregeln der Drehzahlkurve. Ebenso ist ein geringes Überspringen des Drehmomentes zu beobachten, so wie es durch den Faktor $a = 5$ zu erwarten ist. Der Unterschied zwischen beiden Arten der Sollwertberechnung ist vernachlässigbar klein. Signifikante Unterschiede könnten sich bei größeren Sollmomentänderungen ergeben, was am Teststand aufgrund des begrenzten Maximalmoments aber nicht erprobt werden kann. Gut sichtbar ist die auch in der Simulation festgestellte Restwelligkeit der Drehzahl aufgrund der ganzzahligen Drehmomentvorgabe. Die Belastungsmaschine kann das berechnete Moment nicht exakt stellen und pendelt deshalb um das vom Algorithmus vorgegebene Sollmoment. Die

⁸² In der FSE ist ein Rückwärtsfahrbetrieb verboten, kann aber zu Analyse Zwecken am Teststand trotzdem erfolgen. In einem frühen Stadium des Algorithmus wurde dies am Teststand bereits erprobt und zeigte keine Instabilität.

⁸³ Zu einer genaueren Analyse ist eine Betrachtung der Richtung des Gegenmomentes für den Strömungswiderstand erforderlich. Auch dieses kann durch die falsche Abbildung der Richtungen des Drehmoments Verursacher der Instabilität im Rekuperationsfall sein.

⁸⁴ Aufgrund der elektrischen Verpolung beider Maschinen ist die Drehzahl der Antriebsmaschine negativ.

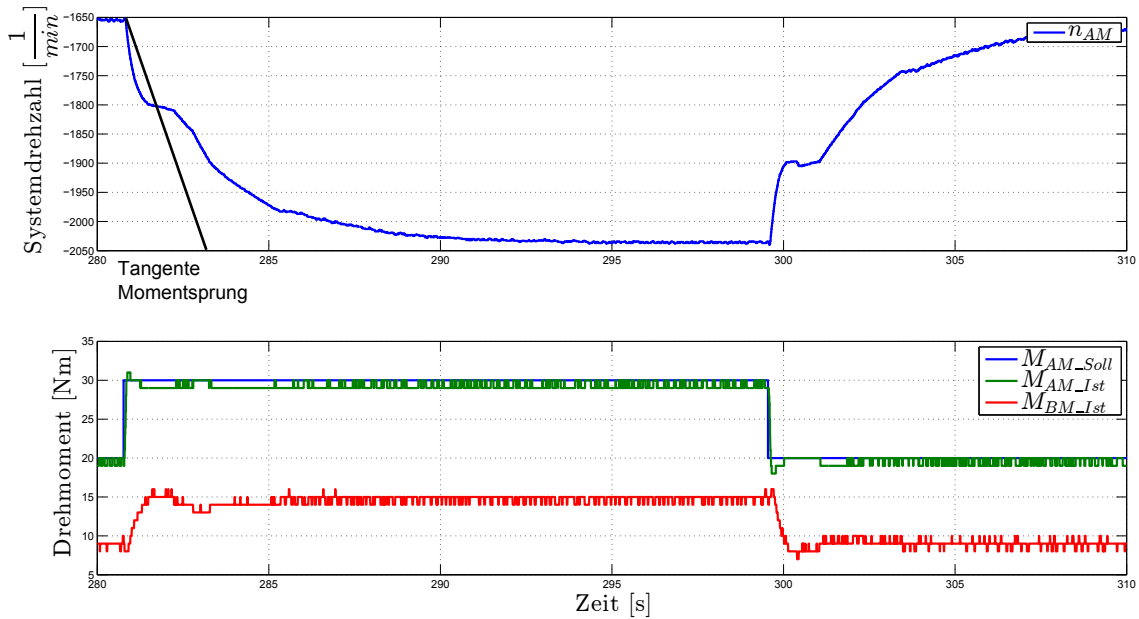


Abbildung 6.4: Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Sollwertberechnung Istwert Antriebsmaschine

Welligkeit der Drehzahl ist allerdings so gering, dass sie vernachlässigt werden kann. Eine Ermittlung der wirksamen Trägheit ist aufgrund des Einflusses des Gegenmomentes in Form des Strömungswiderstandes nur begrenzt möglich. Eine Abschätzung kann aber durch Anlegen einer Tangente zum Zeitpunkt des Drehmomentsprunges erfolgen. Da das System sich zum Zeitpunkt der Sprungfunktion im eingeschwungenen Zustand befindet, entspricht das Differenzmoment des Sprunges zu diesem Zeitpunkt dem zur Beschleunigung nutzbaren dynamischen Moment. Aus diesem ergibt sich dann nach

$$J = \frac{M_{dyn}}{\frac{2\pi \cdot \Delta n}{\Delta t}} = \frac{10 Nm}{\frac{2\pi \cdot 400 \frac{1}{60s}}{3s}} = 0.72 kgm^2$$

in guter Näherung das Trägheitsmoment des Rennfahrzeuges, wobei der Nachweis anhand der Simulation deutlich zuverlässiger ist.

Erfolgt im laufenden Betrieb des Teststandes die Vorgabe eines Nullmomentes an die Antriebsmaschine, so kann dies aufgrund der nur ganzzahlig möglichen Vorgabe des Drehmomentes bei geringen Sollwerten zu Problemen führen. Wie man anhand von Abbildung 6.6 auf Seite 94 sehen kann, pendelt das über die CAN-Botschaft erhaltene Istmoment der Antriebsmaschine aufgrund von Messungenauigkeiten um den Nullpunkt. Dies führt bei Berechnung des Sollwertes der Trägheitssimulation aus dem Istmoment der Antriebsmaschine zu einem ebenfalls schwingenden Moment der Belastungsmaschine, wobei das Schwingen des Istwertes der Antriebsmaschine noch verstärkt wird. In Abbildung 6.7 auf Seite 95 erkennt man die möglichen Folgen dieses Phänomens. Nach Einregeln des Drehzahlsollwertes kann es zu einem unkontrollierten Aufschwingen der Antriebe kommen. Um die Charakteristik der Regelstrecke $G_1(s)$ zu

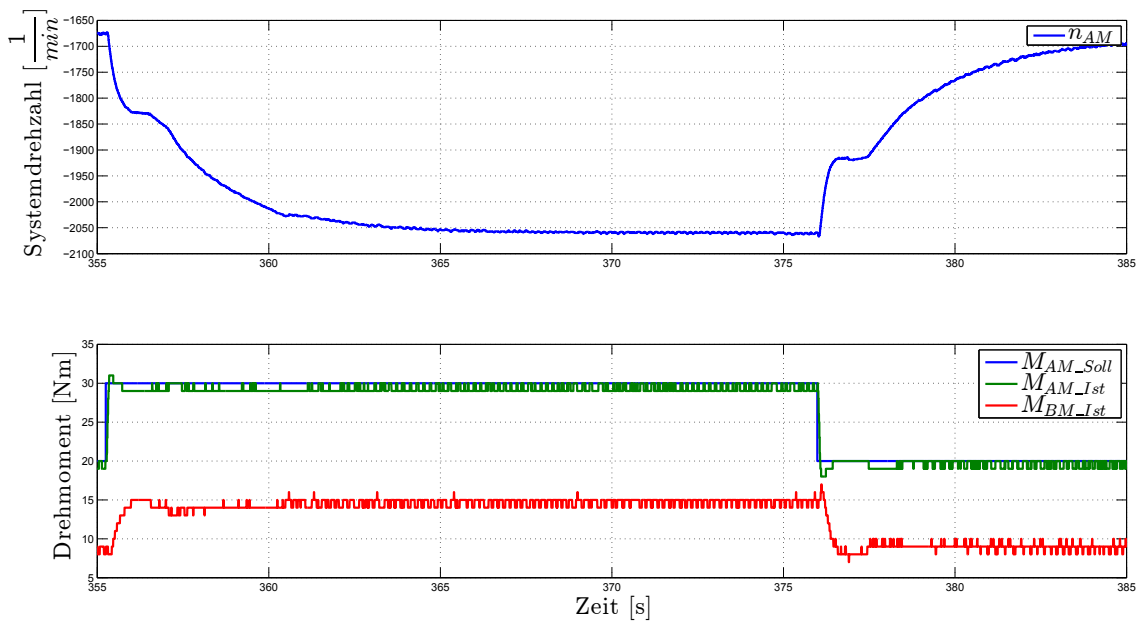


Abbildung 6.5: Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Sollwertberechnung Sollwert Antriebsmaschine

bestimmen, wurde zu Beginn der Arbeit die Sprungantwort des Drehmomentes aufgenommen. Durch das fehlende Gegenmoment der Belastungsmaschine wurde auch dort schon vereinzelt eine Instabilität des Antriebes beobachtet. Der Antrieb selbst ist für den Einsatz im Fahrzeug konzipiert. Dementsprechend ist seine Regelstrategie auch auf den Betrieb mit der mechanischen Trägheit eines Fahrzeuges ausgelegt. Am Teststand ist dieses durch die Verzögerung der Regelung nicht sofort verfügbar und es wirkt bis zum Einregeln nur die geringe mechanische Trägheit der Antriebe und der kurzen Welle. Dies kann zu Problemen bei sehr geringen Momenten führen, was ein weiterer Grund für das Aufschwingen sein kann⁸⁵. Da bei Drehmomenten um den Nullpunkt der Antriebteststand nicht sicher betrieben werden kann, erfolgt ein Abschalten der Regelung bei Vorgaben des Sollmomentes der Antriebsmaschine von unter 5 Nm . Dies führt zu einem Auslaufen der Antriebe mit der mechanischen Trägheit des Teststandes und damit zu einer nicht korrekten Abbildung der Dynamik des Rennfahrzeuges in diesem Bereich. Ein gefährliches Aufschwingen des Systems wird damit aber wirksam verhindert. Oberhalb dieses Sollmomentes erfolgt ein korrektes und stabiles Abbilden der Trägheit des Rennfahrzeuges.

6.2 Antriebsmaschine

Aufgrund der inzwischen erfolgten Beschaffung einer VCU, sollte der Test des Algorithmus der Antriebsmaschine entgegen der ursprünglichen Aufgabenstellung direkt auf der VCU erfolgen. Der Code kann mit dem zur VCU gehörenden Target erzeugt werden, je-

⁸⁵ Das Anbringen einer kleinen mechanischen Trägheit auf die Welle könnte das Verhalten in diesem Bereich verbessern.

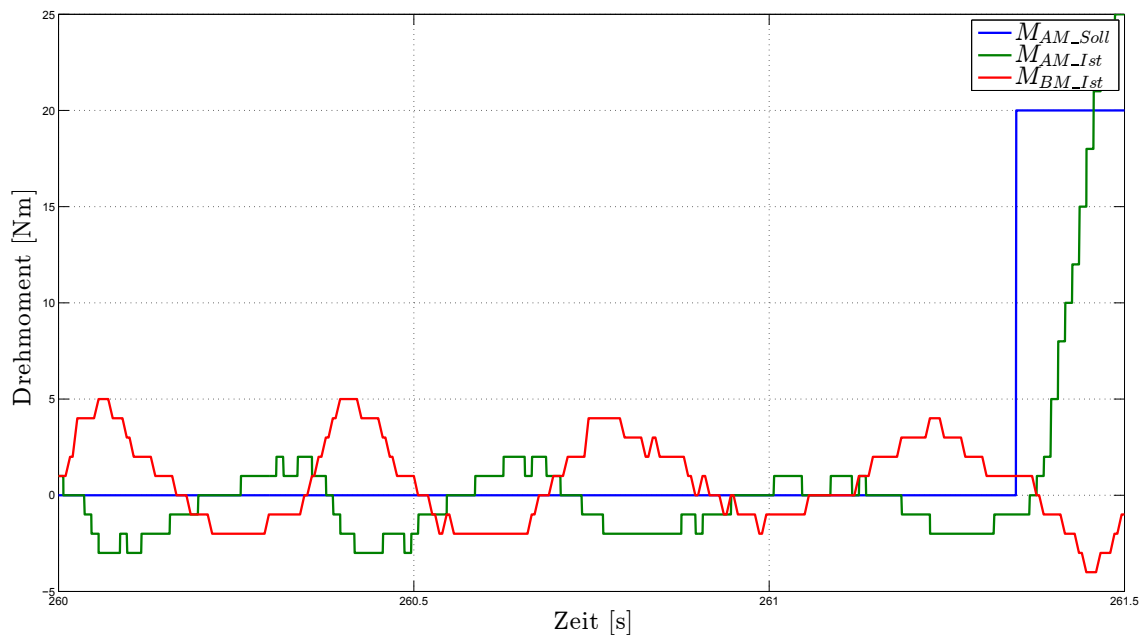


Abbildung 6.6: Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Schwingereignis nach Aktivierung

doch erscheint bei der Generierung der Scoop-IX Schnittstellendatei ein unspezifischer Datentypfehler. Da diese Fehlermeldung in dem herstellereigenen Target auftritt, erfolgt eine Klärung des Fehlers mit dem Hersteller. Ein Lösen des Problems ist im Zeitraum der Arbeit nicht möglich. Um den Algorithmus dennoch überprüfen zu können, erfolgt der Test wie ursprünglich vorgesehen auf dem PC mithilfe von CANOE und einem CAN-Adapter. Die Codegenerierung des Algorithmus für dieses Target funktionierte problemlos. Dabei erfolgte der Test der Algorithmen anfangs ohne, dass die Sollwerte des Algorithmus in der Teststandssteuerung den Signalen der CAN-Botschaften zugeordnet wurden. So konnte ein Debuggen und Testen der Funktionen gefahrlos erfolgen, ohne erst den Umweg über die Simulation gehen zu müssen. Im weiteren Verlauf wurde der Algorithmus dann mit der Teststandssoftware gekoppelt und mit dem Antrieb selbst getestet. Die Reihenfolge der Tests dieses Kapitels entspricht der Reihenfolge, wie sie auch praktisch durchgeführt wurden.

6.2.1 Test der Berechnung der Stellung und Plausibilität der Encoder

Vor Inbetriebnahme der Antriebsmaschine in Zusammenhang mit dem Algorithmus der VCU ist eine Inbetriebnahme der Pedaleinheit erforderlich. Mithilfe der über CAN übertragenen Rohwerte wurden die Endanschläge so eingestellt, dass der in Abbildung 5.24 auf Seite 75 dargestellte erlaubte mechanische Bereich eingehalten wird. Dabei mussten auch Fertigungstoleranzen in der Pedaleinheit beachtet werden, sodass es bei Loslassen der Pedale nicht zu einer Fehlauslösung des Plausibilitätsalgorithmus kommt.

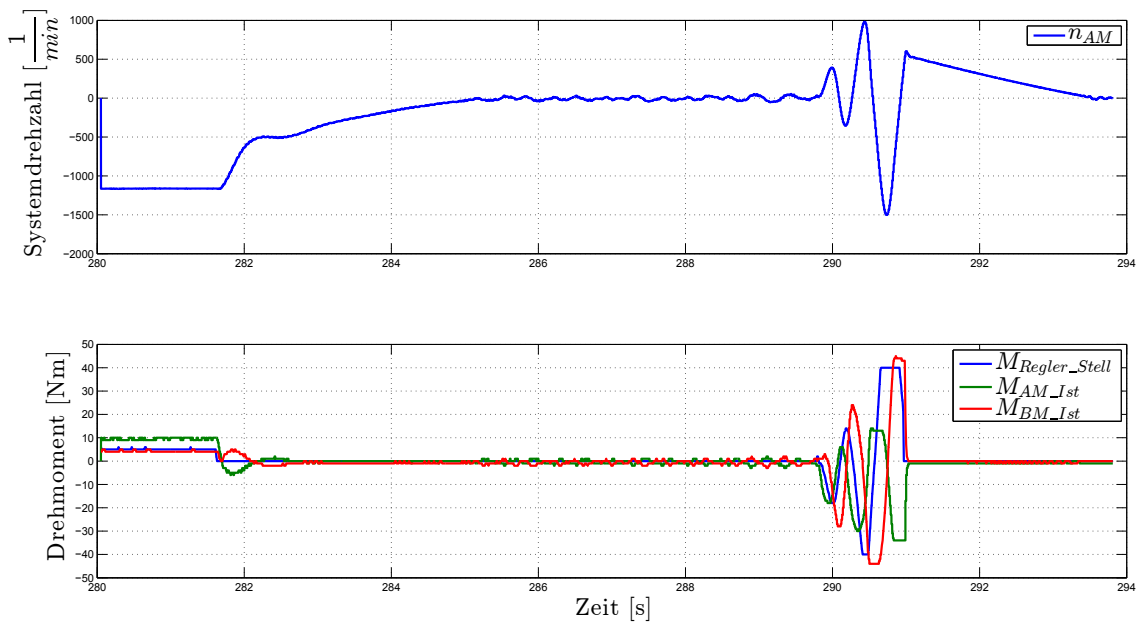


Abbildung 6.7: Test - Trägheitssimulation Belastungsmaschine - Schwingereignis nach Nullmoment

Anschließend erfolgte das Einstellen des zu messenden Betriebsbereiches im Algorithmus der Skalierung der *encoder*.

Um den Algorithmus der *Plausibilität* zu testen, werden beide Potentiometer an einem Pedal verwendet. Die Versorgungsspannung des zweiten Sensors wird verpolt, sodass zwei gegenläufige Kennlinien entstehen. Folgende Tests wurden durchgeführt, wobei das korrekte Setzen bzw. Rücksetzen des Fehlersignals der entsprechenden *encoder* überprüft wurde:

- Bei demontierten Sensoren erfolgt der Kurzschluss- und Drahtbruchtest, indem die Potentiometer an ihre Endanschlüsse gefahren werden.
- Nach Montage eines Sensors erfolgt der Test auf 10%-Abweichung der Kennlinien der *encoder*. Das demontierte Potentiometer wurde nicht bewegt, während das Pedal mitsamt dem zweiten *encoder* betätigt wurde, bis eine Abweichung von 10% auftrat.
- Nach Montage beider Sensoren wurde bei Betätigung des jeweiligen Pedals ein fehlerfreier Betrieb geprüft.

Nach erfolgreichem Test beider Pedale wurde jedes Pedal mit einem Sensor ausgerüstet und die Plausibilität des nicht vorhandenen zweiten *torque* bzw. *brake encoders* zusammen mit dem Test auf 10%-Abweichung deaktiviert, da sonst kein Betrieb möglich wäre. Auf eine Darstellung der Tests wird aus Übersichtsgründen verzichtet. Die korrekte Berechnung der Stellung der *encoder* ist anhand der nächsten Abschnitte ersichtlich.

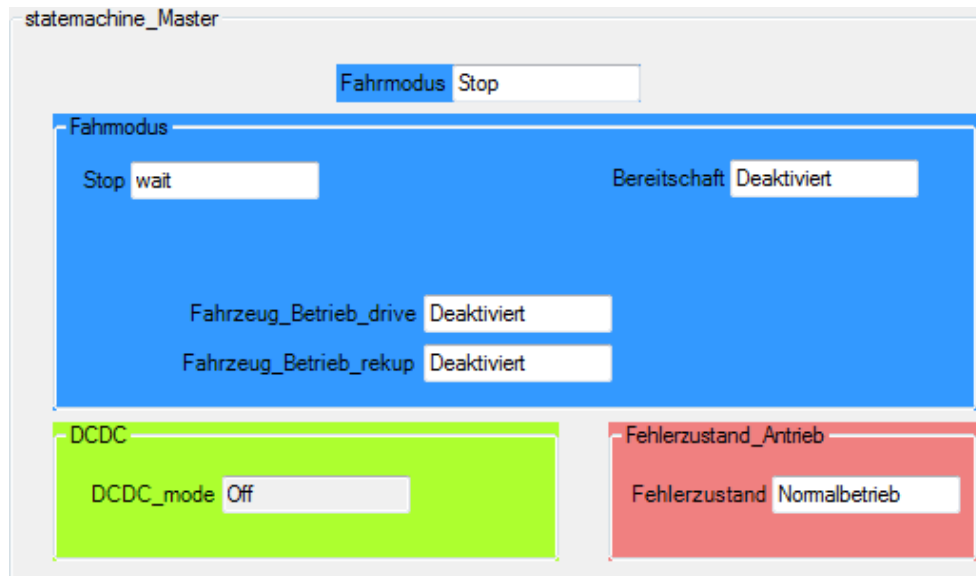


Abbildung 6.8: Bedienpanel - Test Zustandsmaschine

6.2.2 Test der Zustandsmaschine Betriebsmodus Fahrzeug

Für diesen Test wurde eine Nachbildung der Zustandsmaschine im Bedienpanel von CANOE erstellt, um die einzelnen Zustände und ihre Transitionen in allen Ebenen prüfen zu können. Im Algorithmus der Zustandsmaschine besteht die Möglichkeit, die einzelnen Zustände aller Ebenen ausgeben zu lassen. Diese wurden mit Systemvariablen in CANOE und mit der zugehörigen Anzeigefläche verknüpft. Für bessere Lesbarkeit wurde den Systemvariablen eine Liste mit dem jeweiligen enumeration-Datentyp hinterlegt, um einen Wechsel in der Zustandsmaschine schnell erkennen zu können. Ein Ausschnitt des Panels mit den betreffenden Funktionen ist in Abbildung 6.8 zu sehen. Um zeitliche Zusammenhänge wie Wartezeiten testen zu können, wurde die *statetracker-Funktion* von CANOE genutzt. Die Softwareschalter wurden ebenfalls mit Bedienelementen des Bedienpanels verknüpft. Dies ist vor allem für den Test der Fehlerbearbeitung nötig.

Während des Testes wurde die Änderung der verschiedenen Zustände des AMS bzw. der AIRs und des DCDC-Wandlers über Schaltflächen durchgeführt, die über eine Systemvariable eine Änderung des jeweiligen Signals der CAN-Botschaft durchführen. Dies ist für ein schrittweises Durchtesten erforderlich. Um Tests ab Abschnitt 6.2.3 auf Seite 98 zu beschleunigen, wurden das AMS und die AIRs im Rahmen einer minimalen Restbussimulation automatisiert⁸⁶. Diese beschränkt sich darauf, dass bei einer Anforderung der Komponente nach einer zeitlichen Verzögerung eine positive Rückantwort gesendet wird. Dabei wurde die nötige Zeit berücksichtigt, die der Teststand für ein geregeltes Herunterfahren benötigt. Da der Test und die Messung aller Zustandsübergänge

⁸⁶ Da der DCDC-Wandler zum Antriebssystem gehört und damit bereits vorhanden ist, konnte dieser direkt angesteuert werden. Das Öffnen der AIRs schaltet den Teststand spannungsfrei, nachdem die VCU die Antriebsmaschine und die Teststandssteuerung die Belastungsmaschine heruntergefahren hat.

sehr aufwendig ist, würde eine Darstellung den Rahmen der Arbeit überschreiten. Stattdessen erfolgt nachfolgend die Darstellung der Vorgehensweise des durchgeführten Tests. Die Reihenfolge konnte nicht immer exakt eingehalten werden, da einige Transitionen übergeordneter Zustände ein Weiterschalten in einem untergeordneten Zustand verlangen, dies ändert aber nichts an der grundsätzlichen Vorgehensweise.

1. Test der Fehlerbearbeitung

- a) Test der Transitionen, die einen Fehler verursachen
 - i. Fehler AMS, Fehler IMD
 - ii. Fehler Antrieb
 - iii. Fehler *encoder*
 - iv. Spannung GLVS zu hoch bzw. zu niedrig
 - v. Fehler Kühlung, Fehler BPSD
- b) Test der Transitionen, die zu einem „höherwertigen“ Fehler führen, auch über mehrere Ebenen
- c) Test der Bedingungen, die einen Fehler zurücksetzen - nur die jeweilige Rückstellmethode darf nach Beseitigung des Fehlers diesen rücksetzen
- d) Test mehrerer Fehler derselben Kategorie - ein Zurücksetzen darf nur bei Beseitigung aller Fehler möglich sein
- e) Test von Fehlern verschiedener Kategorien - bei Beseitigung und Bestätigung nur des höherwertigen Fehlers muss der niederwertige Fehlerzustand eintreten

2. Test des Fahrmodus ⁸⁷

- a) Test der Transitionen zwischen den Hauptfunktionen
- b) Test der Deaktivierung des TS
- c) Test der Aktivierung des TS
- d) Test der Fahrbereitschaft
 - i. Aktivierung der Rekuperation⁸⁸
 - ii. Shutdown bei Betätigung beider Pedale

3. Test des DCDC-Wandlers

- a) Test der Transitionen Aktivierung DCDC-Wandler
- b) Test der Transitionen Entladen des Zwischenkreises

⁸⁷ Dieser Test erfolgte unter Spannung, um ein Weiterschalten in den Fahrbetrieb zu ermöglichen.

⁸⁸ Dieser Test kann gefahrlos durch manuelles Anfahren eines Antriebes in der Nähe der Umschaltdrehzahl für $v = 5 \frac{km}{h}$ erfolgen.

4. Gesonderter nochmaliger Test aller Events ⁸⁹

- a) Fehlerevents - müssen in der Zustandsmaschine die jeweilige Transition auslösen
- b) Dischargeevent - muss ein Entladen des Zwischenkreises auslösen

6.2.3 Test der Drehmomentbereitstellung und Begrenzung der Rekuperation

Um die Priorisierung der *encoder* und das Abschalten bei gleichzeitiger Betätigung testen zu können, erfolgte eine Messung der auf das Maximalmoment des Teststands normierten *encoder*-Signale und das Sollmoment des Algorithmus ⁹⁰. Die in Abbildung 6.9 auf der nächsten Seite dargestellte Messung erfolgte, während dem Antrieb manuell über die übergeordnete Teststandssteuerung ein Sollmoment vorgegeben wurde. Die ersten beiden markierten Punkte stellen ein ansteigendes Betätigen des *brake encoders* über die 5%-Grenze hinaus dar, während der *torque encoder* ebenfalls betätigt wird. Bei Überschreiten der Grenze geht der Algorithmus vom Wunsch des Bremsens aus und gibt dem Antrieb ein Bremsmoment vor. Überschreitet nun der *torque encoder* die 25%-Grenze, gibt der Antrieb vorschriftsgemäß kein Moment ab, was an den beiden Datenpunkten in der Mitte der Abbildung erkennbar ist. Die beiden Datenpunkte auf der rechten Seite zeigen das Freigeben des Momentes, sobald der *torque encoder* die 5%-Grenze wieder unterschritten hat.

Die Rekuperation muss bei Geschwindigkeiten bis $5 \frac{km}{h}$ abgeschaltet sein, was in Abbildung 6.10 auf Seite 100 zu sehen ist. Da am Teststand nur die Drehzahl der Antriebe messbar ist, wird der Geschwindigkeitsgrenzwert nach

$$n = i_G \cdot \frac{v}{2\pi \cdot r} = 6 \cdot \frac{5 \frac{km}{h}}{2\pi \cdot 0.25 m} = 318,3 \frac{1}{min}$$

umgerechnet. Unterschreitet der Antrieb diese Geschwindigkeitsgrenze, erfolgt ein Abschalten der Rekuperation, auch bei fortgesetzter Betätigung des *brake encoders*.

Weiterhin erfolgte eine Aufnahme des vom Algorithmus berechneten Bremsmomentes zusammen mit der Pedalstellung des *brake encoders*. Die mittels der Gleichung $B_H = \frac{M_1 \cdot i_G}{r_{Rad}}$ auf die Abtriebsseite zurückgerechnete Bremskraft ist, normiert auf die Gewichtskraft des Fahrzeuges, über der Abbremsung z bzw. der Pedalstellung in Abbildung 6.11 auf Seite 100 dargestellt. Anhand der zwei Datenpunkte bestimmt sich der

⁸⁹ Für diesen Test wurde nur ein Fehler der jeweiligen Kategorie gewählt, da die Transitionen schon getestet wurden. Er stellt teilweise eine Wiederholung vorangegangener Tests dar, die Events sind aber sicherheitsrelevant.

⁹⁰ Der 5%-Grenzwert entspricht dabei einem Moment von $2 Nm$, während die 25%-Grenze bei einem Moment von $10 Nm$ eintritt. Der *torque encoder* wird in den folgenden Abbildungen mit t_{enc} und der *brake encoder* mit b_{enc} bezeichnet.

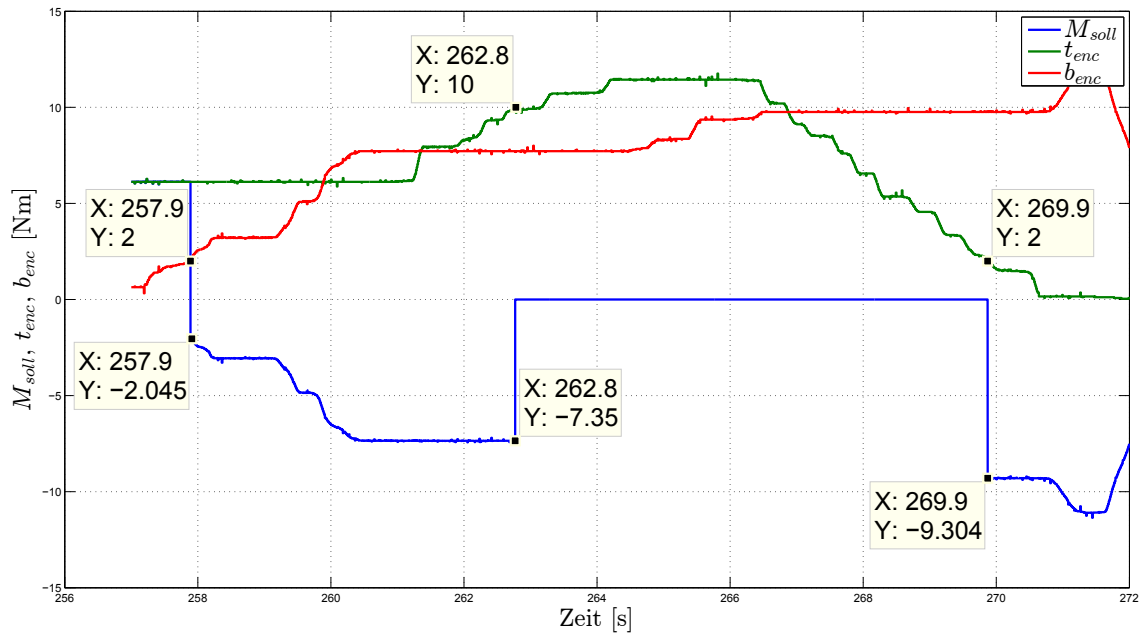


Abbildung 6.9: Test - Priorisierung Pedal, Abschaltmechanismus

Anstieg der Kennlinie zu $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{0,1976 - 0,05652}{0,7 - 0,5} = 0,2822$, was dem vorher berechneten Bremskraftverhältnis i_B entspricht. Bei sehr geringen Abbremsungen wirkt auf die Hinterachse keine regenerative Bremskraft, da aufgrund des Priorisierungsalgorithmus die 5 %-Grenze des Pedalweges erst erreicht werden muss, bevor eine Freigabe des Bremsmomentes erfolgt, wie an dem Einschnitt zu Beginn der Kennlinie zu sehen ist. Das Einhalten der maximalen Bremskraft der Hinterachse sorgt für Stabilität beim Bremsen, da sich die Vorderachse vor der Hinterachse an der Haftgrenze befindet. Ein stärkeres Treten des Pedals resultiert im Blockieren beider Achsen und einem Rutschen über alle Räder, wie es auch ein Test der FSE vorsieht.

Als letzter Test dieses Abschnittes wurde der Antriebteststand als Fahrsimulator benutzt, indem der *torque encoder* das Sollmoment der Antriebsmaschine bestimmt, während die Trägheitsregelung die Belastungsmaschine regelt. Da der Algorithmus der Trägheitsregelung noch nicht im Bereich des regenerativen Bremsens funktioniert, konnte ein Bremsen der Antriebsmaschine durch Betätigung des *brake encoder* nicht erfolgen. Der Beschleunigungsvorgang ist bei Erreichen des oberen Grenzmomentes in Abbildung 6.12 auf Seite 101 dargestellt.

6.2.4 Test der Begrenzung der Leistung

Um den Algorithmus der Leistungsbegrenzung testen zu können, wurde ein Fahrprofil mit einer Leistungsbegrenzung von $P_{zu} = 2000\text{ W}$ bzw. $P_{ab} = P_{zu} \cdot \eta = 2000\text{ W} \cdot 0,9 = 1800\text{ W}$ am Antriebteststand aufgenommen. Dazu wurde der *torque encoder* betätigt und das vom Algorithmus an den Antrieb gesendete Sollmoment aufgezeichnet, was

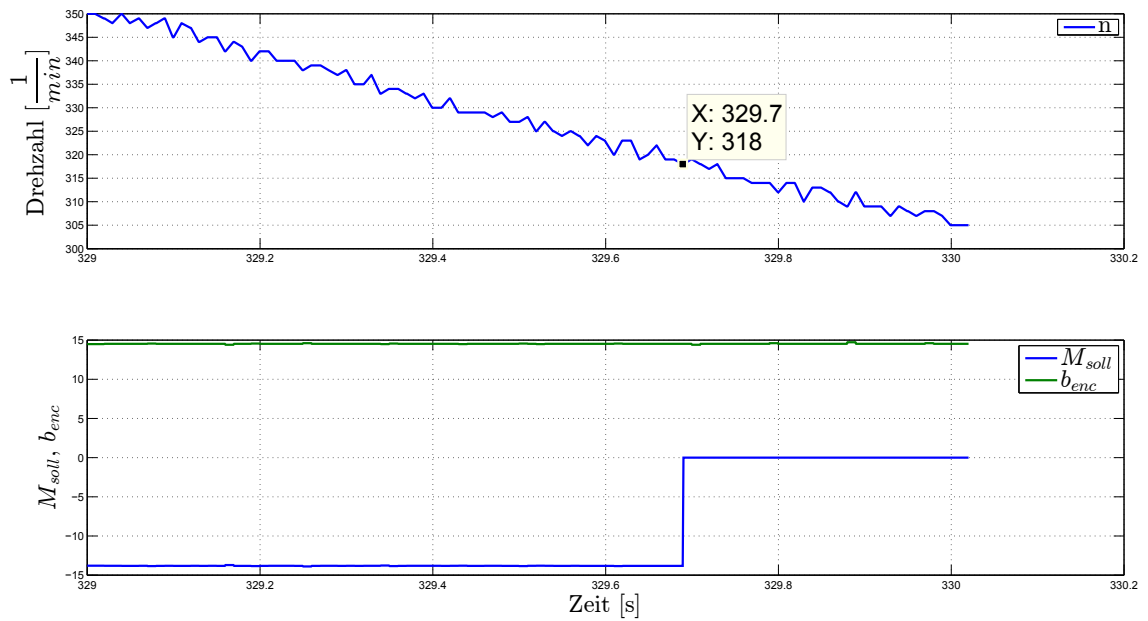


Abbildung 6.10: Test - Geschwindigkeitsgrenze Rekuperation

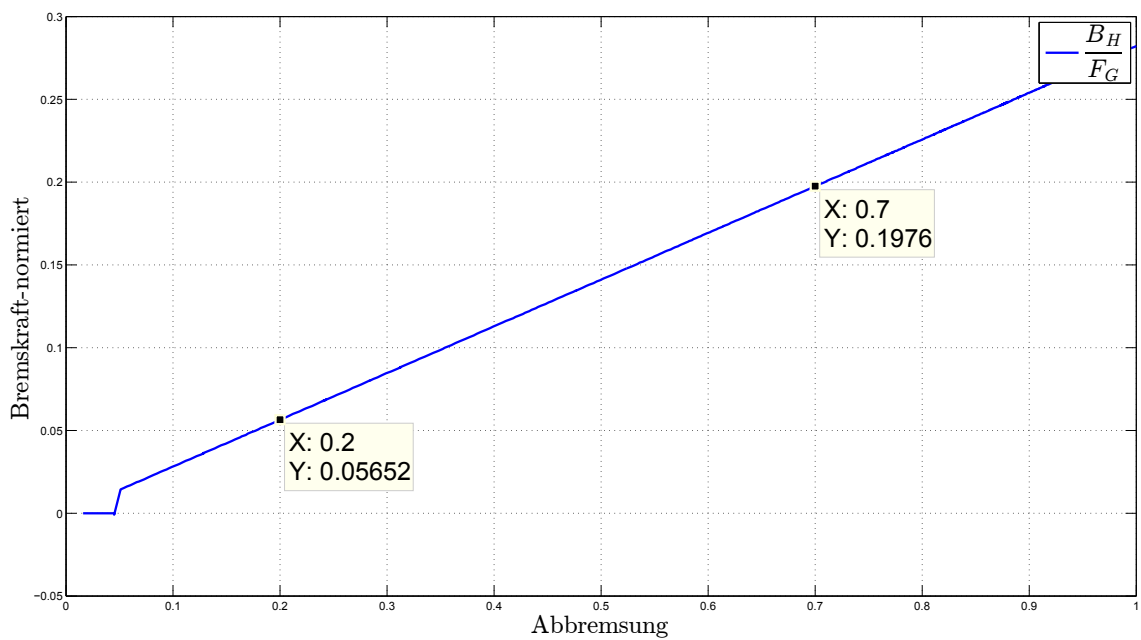


Abbildung 6.11: Test - Verhältnis Bremskraft-Abbremsung

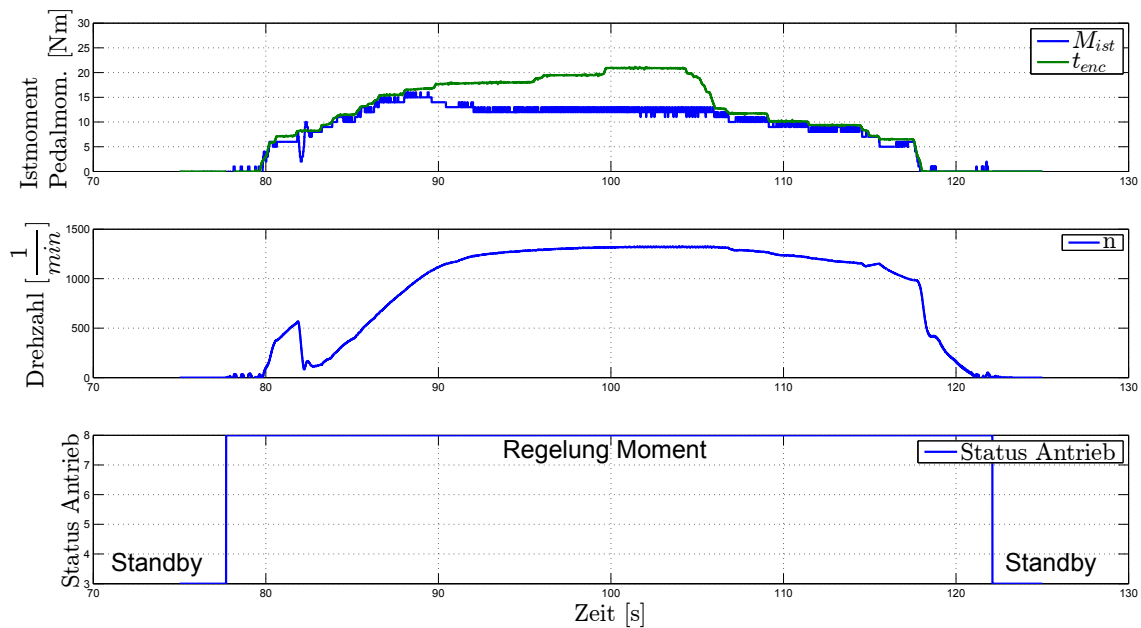


Abbildung 6.12: Test - Vorgabe Sollmoment Antrieb

in Abbildung 6.13 auf der nächsten Seite dargestellt wird ⁹¹. Zusätzlich erfolgte eine Aufzeichnung von Ist-drehzahl und Istmoment des Antriebes. In Abbildung 6.14 auf der nächsten Seite sind die Drehzahl und die berechnete momentane mechanische Leistung zu sehen. Mit steigendem Pedalweg und steigender Drehzahl sinkt das mögliche obere Grenzmoment des Antriebes. Die mechanische Leistung wird auf den vorher festgelegten Grenzwert beschränkt, obwohl der Nutzer durch das weitere Betätigen des *torque encoders* eine höhere Drehmomentanforderung vorgibt.

Am Teststand ist es aus Sicherheitsgründen nicht möglich, den Antrieb voll auszulasten. Durch das am Rennfahrzeug größere verfügbare Moment ist eine Überschreitung des Grenzwertes der elektrischen Leistung kurzzeitig möglich. Am Fahrzeug muss dies getestet und die elektrische Leistung auf eine zeitliche Überschreitung der in Abschnitt 5.4.1.2 auf Seite 68 beschriebenen Grenzen überprüft werden. Hierbei kann gleichzeitig eine Aufnahme des zur Berechnung nötigen Kennlinienfeldes des Wirkungsgrades erfolgen.

6.2.5 Test der Ansteuerung des Antriebes, DCDC-Wandlers und des AMS

Als letzter Test ist eine Überprüfung der korrekten Ansteuerung des Antriebes über seine CAN-Botschaften vorgesehen. Dabei muss die aus Abbildung 5.17 auf Seite 66 bekannte Aktivierungsvorschrift mitsamt der im entsprechenden Abschnitt beschriebenen

⁹¹ Der Pedalweg des *torque encoders* wurde in der Darstellung für bessere Vergleichbarkeit auf den Maximalwert des am Teststand einstellbaren Momentes normiert.

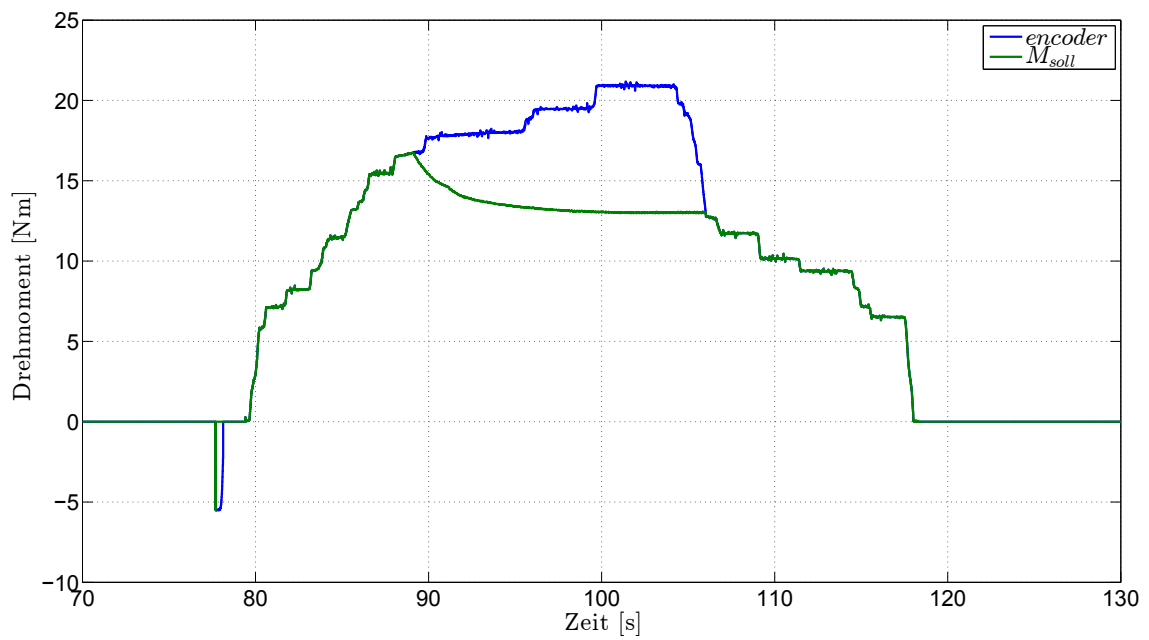


Abbildung 6.13: Test - Leistungsbegrenzung - oberes Grenzmoment

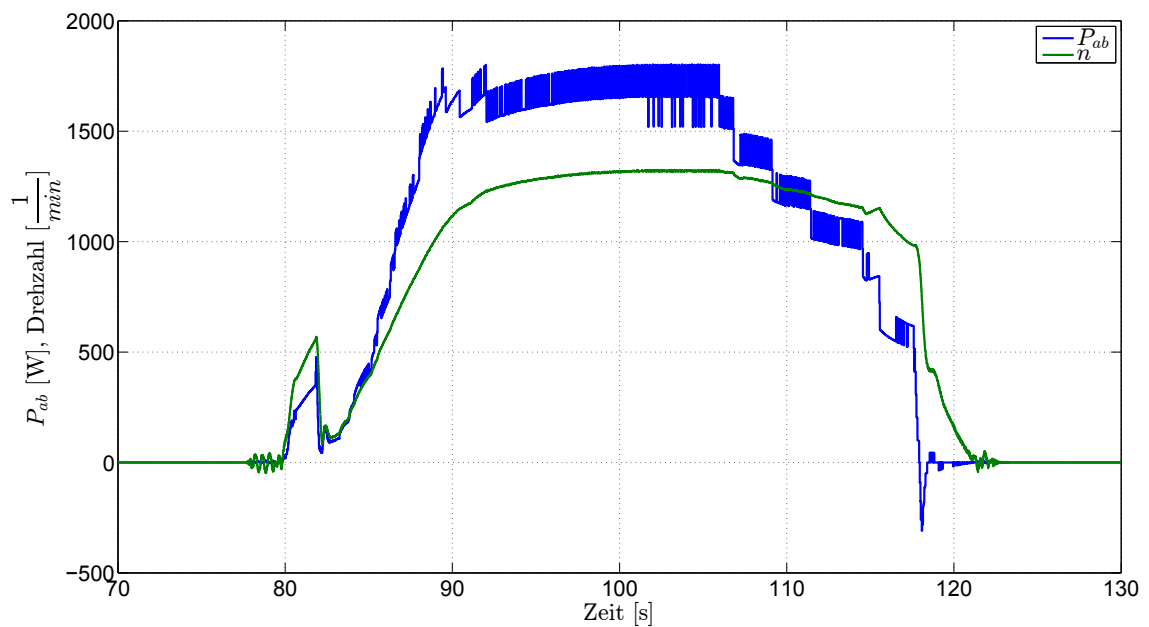


Abbildung 6.14: Test - Leistungsbegrenzung - Maximalleistung

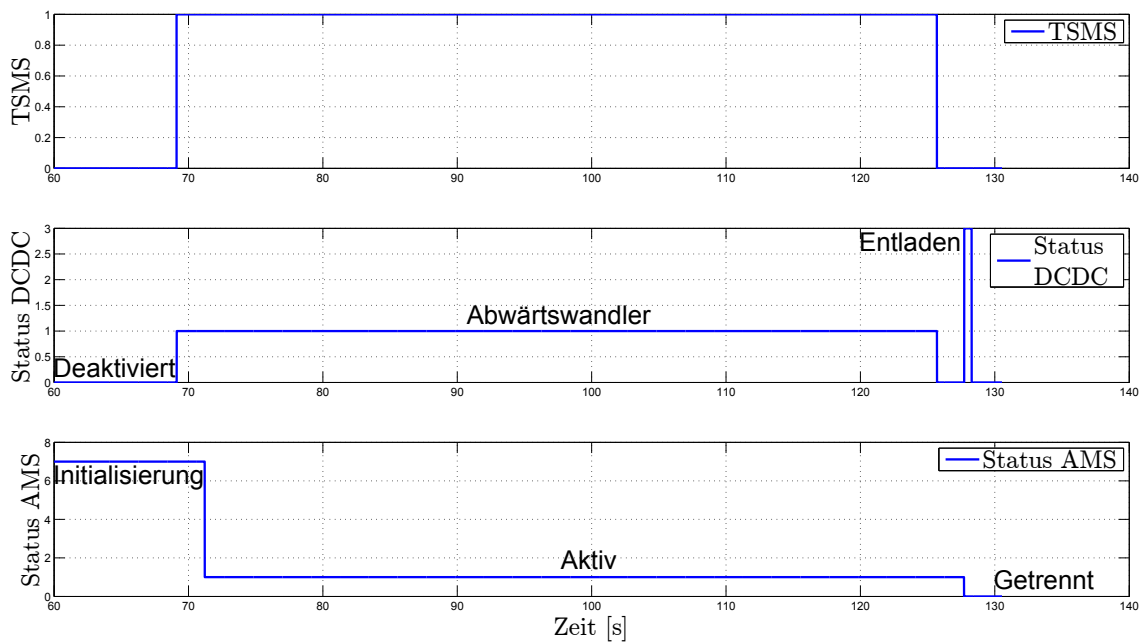


Abbildung 6.15: Anfahr- und Abfahrsszenario

Anpassung an das Rennfahrzeug eingehalten werden. Aus Übersichtsgründen erfolgt die Darstellung des An- und Abfahrsszenarios in Abbildung 6.15 getrennt von der Darstellung der Fahrbereitschaft in Abbildung 6.16 auf der nächsten Seite. Der jeweils aufgenommene Status der Komponenten in den Abbildungen stellt die Rückmeldung der Baugruppe auf einen Befehl des Algorithmus dar. Die Aktivierung des TSMS veranlasst den Algorithmus das AMS zu aktivieren, welches diesen Befehl mit einer zeitlichen Verzögerung ausführt. Dies resultiert ebenfalls in einer Aktivierung des DCDC-Wandlers in den Betriebsmodus *Abwärtswandlung* und damit zu einem Aufladen des Energiespeichers des GLVS, sobald das TS aktiviert ist ⁹². Ein Deaktivieren des TS und damit der Trennung der AIRs durch das AMS führen nach einer kurzen Wartezeit zu einem Deaktivieren des DCDC-Wandlers und einem Entladen des Zwischenkreises. Die Wartezeit lässt der übergeordneten Teststandsteuerung genug Zeit, die Gleichspannungsquelle des Teststandes abzukoppeln.

Die Fahrbereitschaft des Antriebes wurde bei aktiviertem AMS und aktivierter Zündung geprüft. Der Antrieb ist erst betriebsbereit, wenn bei getretener Bremse der Startbefehl gegeben wurde. Bei unbetätigtem Pedal ist der Startbefehl wirkungslos. Nach einem Fahreinsatz und dem Betätigen des Stopbefehles wird der Antrieb wieder in den *Standby-Modus* versetzt. In diesem stellt er keine Gefahr mehr dar, da er nicht auf eine Sollmomentvorgabe reagiert.

⁹² Da am Teststand die Simulation des Status des AMS und des Softwareschalters TSMS nur in die Abschaltautomatik des Teststandes eingebunden ist, wird der DCDC-Wandler vor Aktivierung des AMS zugeschaltet, da der Teststand zu diesem Zeitpunkt bereits unter Spannung steht.

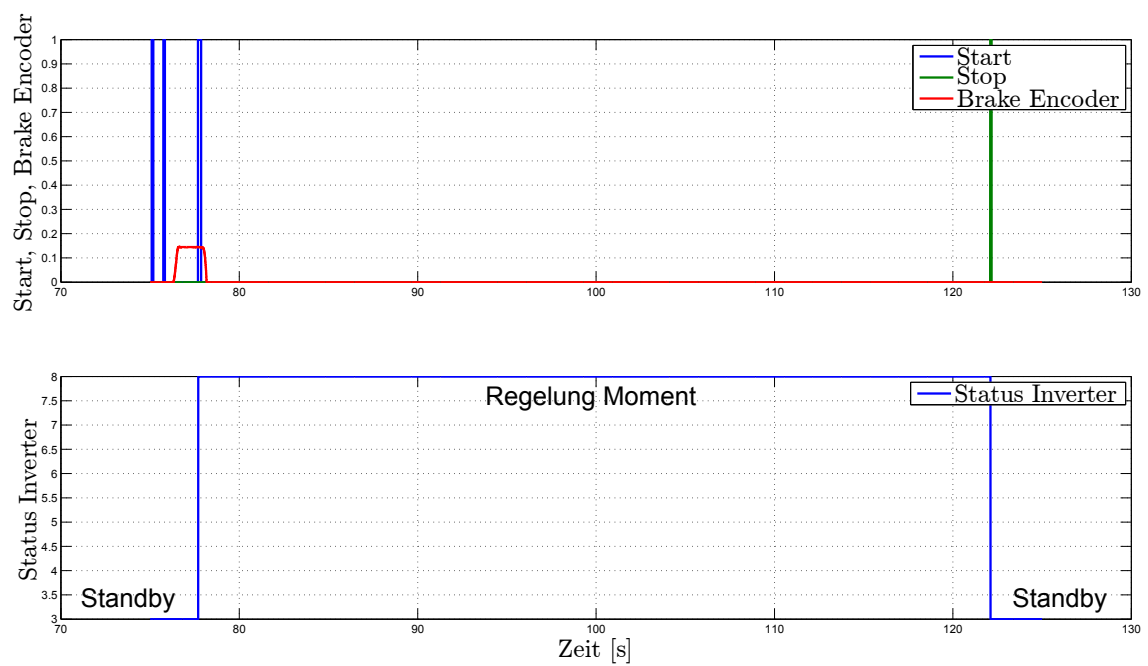


Abbildung 6.16: Fahrbereitschaft Antrieb

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Masterarbeit wurde die Ansteuerung zweier baugleicher elektrischer Antriebe über ein CAN-Bussystem als Bestandteil eines Antriebteststandes beschrieben, wovon einer in einem Rennfahrzeug der FSE eingesetzt wird. Dieser soll zukünftig als Fahr Simulator genutzt werden.

Zunächst wurde für den Antriebsstrang des Elektrorennfahrzeuges ein Sicherheitskonzept erstellt. Dieses behandelt neben dem Einsatz in den Wettbewerben der FSE und ihrem Regelwerk auch die Besonderheiten, die bei einem Einsatz auf dem Teststand zu beachten sind. Neben der Analyse und Bewertung der Gefahren wurden Gegenmaßnahmen und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Zu Beginn der Entwicklung wurde eine Simulation, in der die in der Arbeit zu erstellenden Algorithmen der Antriebs- und Belastungsmaschine erprobt werden können, erstellt. Um die Trägheit des Fahrzeuges für die Verwendung als Fahr Simulator abzubilden, erfolgte die Entwicklung eines Regelalgorithmus, welcher in der erstellten Simulation auf Funktionsfähigkeit überprüft wurde. Zusätzlich erfolgt die Berücksichtigung des Luftwiderstandes des Rennfahrzeuges. Die damit angesteuerte Belastungsmaschine bildet die Dynamik eines Elektrorennfahrzeuges mit Ausnahme von Sollmomenten nahe des Nullpunktes realistisch ab, sodass ein Teil der Entwicklungsschritte für das Fahrzeug am Antriebteststand erfolgen kann. Dieses Ziel wurde für den Vorwärts- und Schubbetrieb des Fahrzeuges erreicht. Im Bereich des regenerativen Bremsens ist der Algorithmus trotz Funktionsweise innerhalb der Simulation noch nicht verwendbar.

Die Ansteuerung der Antriebsmaschine sollte über eine zentrale Steuerung erfolgen. Dies bedingte die Einbeziehung weiterer Komponenten des Fahrzeuges. Dazu gehörten neben Bestandteilen des *shutdown circuit* die Einbeziehung eines zukünftig vorhandenen AMS und der Pedaleinheit, deren Daten ausgewertet wurden. Diese Daten waren Grundlage der Sollmomentberechnung des Algorithmus, der auch die Fahrbarkeit beim regenerativen Bremsen berücksichtigt. Zur Erstellung der Steuer Algorithmen wurde schon am Teststand das Regelwerk der FSE beachtet, um die zukünftige Integration des Antriebes in das Rennfahrzeug zu vereinfachen.

Die Integration der erstellten Algorithmen der Antriebsmaschine in die zur Mitte der Arbeit verfügbare Fahrzeugsteuerung wurde vorbereitet, konnte aber aufgrund von Problemen bei der Codeerzeugung nicht abgeschlossen werden. Der Test des erzeugten Codes auf einem PC und die Ansteuerung mithilfe der Teststandssoftware sind erfolgreich verlaufen. Die Ansteuerung bzw. Auswertung relevanter Komponenten erfolgte aufgrund

der PC-Plattform softwarebasiert bzw. über die CAN-Schnittstelle. Der Test der Algorithmen der Rekuperation erfolgte aufgrund der genannten Einschränkungen bei der Ansteuerung der Belastungsmaschine anhand des berechneten Sollmomentes.

Der Antriebteststand kann im Bereich des Beschleunigungs- und Schubbetriebs als Fahrsimulator verwendet werden.

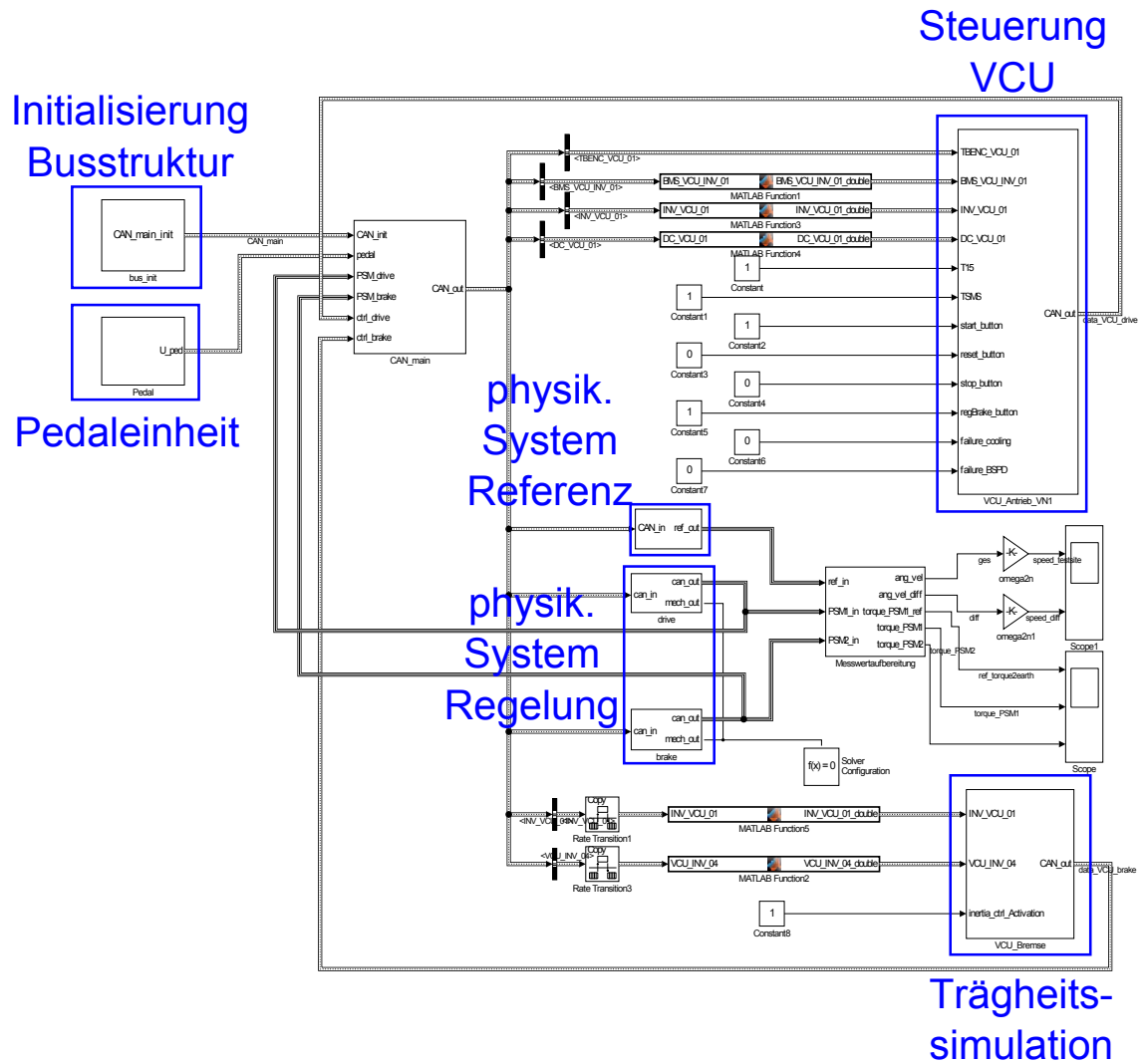
7.2 Ausblick

Der Algorithmus der Nachbildung der Fahrzeugträgheit ist noch nicht im Bereich des regenerativen Bremsens verwendbar. Aufgrund der Funktionsweise im Simulationsmodell sollte im Nachgang der Arbeit eine Überarbeitung des physikalischen Modells erfolgen, um das Verhalten bei rekuperierendem Antrieb korrekt abbilden zu können. Anschließend kann der Algorithmus der Belastungsmaschine angepasst und getestet werden.

Um den Fahrsimulator vollständig in Betrieb nehmen zu können, ist nach Anpassung des Algorithmus der Trägheitssimulation ein Test des regenerativen Bremsens mit der Pedaleinheit erforderlich. Verläuft dieser Test erfolgreich, ist eine Verwendung als Fahrsimulator in allen relevanten Betriebsbereichen möglich.

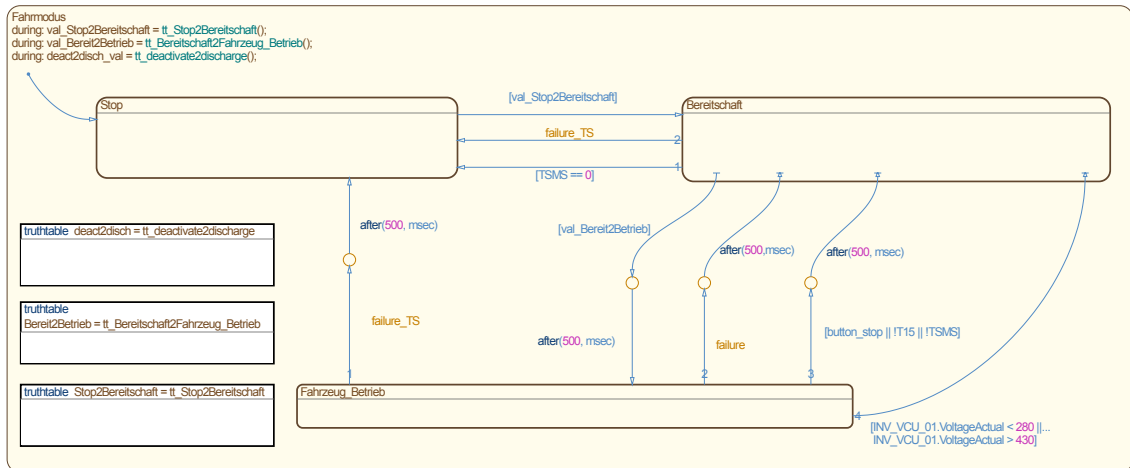
Der Algorithmus der Antriebsmaschine ist sehr komplex. Hier müssen noch Erweiterungen, wie das Ansteuern des *Ready-To-Drive-Sound*, die im erstellten Algorithmus aus Zeitgründen fehlen, implementiert werden. Sobald die Kommunikationsmatrix des AMS verfügbar ist, wird eine Anpassung an die Software der Fahrzeugsteuerung nötig sein. Anhand der Daten des AMS wurde eine Implementierung soweit möglich vorbereitet, Änderungen sind aber nicht zu vermeiden. In der Arbeit konnte nicht immer auf Daten des aktuellen Fahrzeuges zugegriffen werden. Diese sollten in das in der Arbeit erstellte Berechnungsskript zur Weiterverarbeitung eingearbeitet werden, sobald diese für das Elektromotorenfahrzeug bekannt sind.

Für eine Implementierung der Software zur Ansteuerung des Antriebes des Rennfahrzeuges in der vorhandenen VCU müssen aufgetretene Probleme mit dem Hersteller besprochen und beseitigt werden. Wurde der Algorithmus in die VCU implementiert, sollte gleichzeitig das vorhandene I/O-Modul in die Software eingebunden werden. Ist die externe Entwicklung am CAN-Sensorknoten abgeschlossen, kann dieser an einzelnen Sensoren getestet werden und seine Funktion mithilfe des I/O-Moduls verifiziert werden. Ebenso muss die Software der VCU für eine erfolgreiche Teilnahme an den Wettbewerben der FSE um weitere fahrdynamische Funktionen erweitert werden.

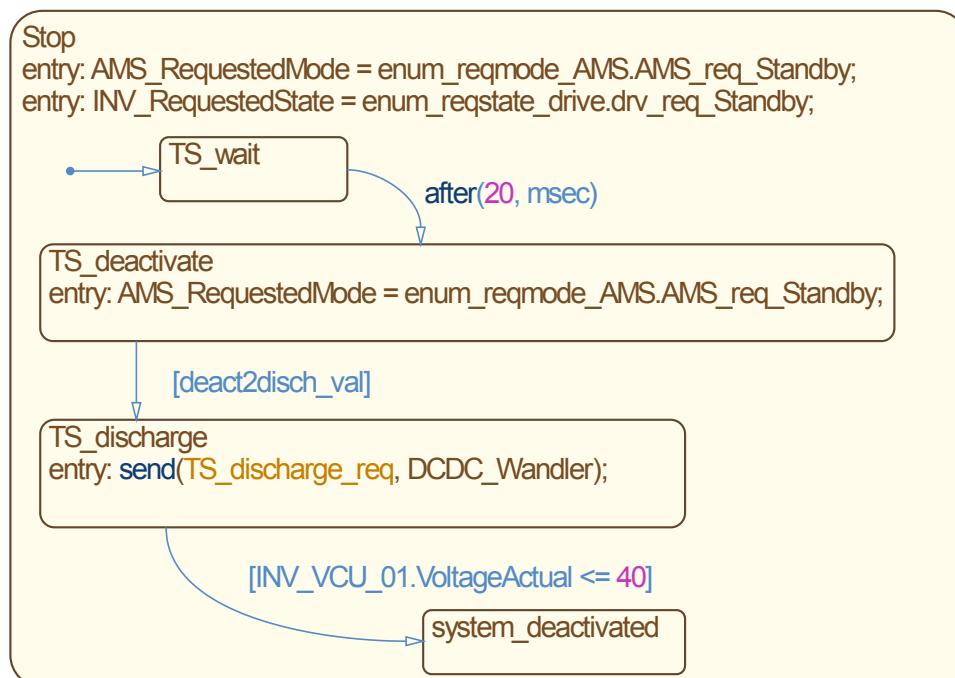


Anhang B: Simulinkmodell VCU - Zustandsmaschine

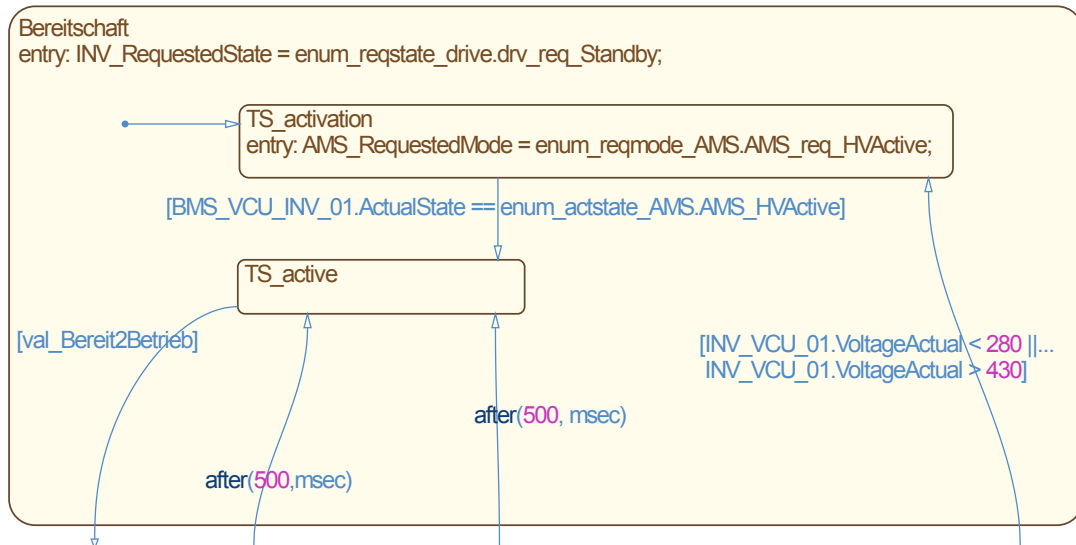
B.1 Fahrmodus



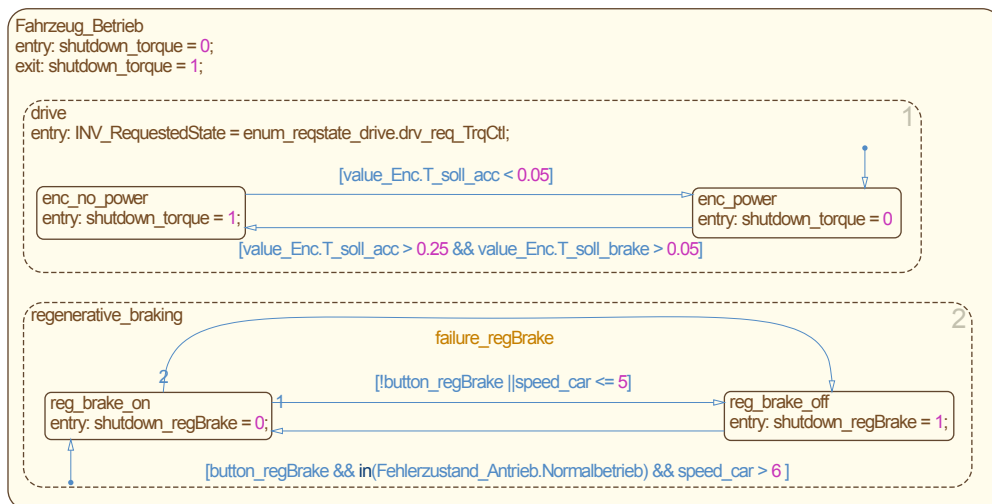
B.1.1 Stop



B.1.2 Bereitschaft



B.1.3 Fahrzeug_Betrieb



B.1.4 Wahrheitstabellen

(truth table)

Teststand_Komponenten_MA_print/VCU_Antrieb_VN1630/Chart.Fahrmodus.tt_Bereitschaft2Fahrzeug_Betrie

Condition Table:

#	Description	Condition	1	2
1	driver pressing Start-Button	button_start	T	-
2	T15 is set (like ignition on)	T15	T	-
3	No failure	!in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure)	T	-
4	no Failure failure_TS	!in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_uncritical)	T	-
5	no failure critical	!in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_critical)	T	-
6	TS voltage within boundary	INV_VCU_01.VoltageActual > 280	T	-
7	TS voltage within boundary	INV_VCU_01.VoltageActual < 430	T	-
8	brake must be actuated	actuation_brake	T	-
		Actions	1	2

Action Table:

#	Description	Action
1	ready to start the edrive -> transition from "Bereitschaft" to "Fahrzeug_Betrieb"	Bereit2Betrieb = 1
2	not ready to start the edrive -> no transition from "Bereitschaft" to "Fahrzeug_Betrieb"	Bereit2Betrieb = 0

(truth table)

Teststand_Komponenten_MA_print/VCU_Antrieb_VN1630/Chart.Fahrmodus.tt_Stop2Bereitschaft

Condition Table:

#	Description	Condition	1	2
1	T15 is set (like ignition on)	T15	T	-
2	TSMS is set	TSMS	T	-
3	No failure of the TS	in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_critical)	F	-
4	No failure of the TS	in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_uncritical)	F	-
5	no discharging of DCDC-converter	in(DCDC_Wandler.Discharge)	F	-
		Actions	1	2

Action Table:

#	Description	Action
1	ready to start the edrive -> transition from "Bereitschaft" to "Fahrzeug_Betrieb"	Stop2Bereitschaft = 1
2	not ready to start the edrive -> no transition from "Bereitschaft" to "Fahrzeug_Betrieb"	Stop2Bereitschaft = 0

B.2.2 Wahrheitstabellen

(truth table)

Teststand_Komponenten_MA_print/VCU_Antrieb_VN1630/Chart.Fehlerzustand_Antrieb.tt_Normal2failure

Condition Table:

#	Description	Condition	1	2
1	GLVS voltage too high	DC_VCU_01.ActualVoltageLV > 16	F	-
2	GLVS voltage too low	DC_VCU_01.ActualVoltageLV < 9	F	-
3	Cooling edrive/DCDC malfunction	failure_cooling	F	-
4	Failure Brake System	failure_BSPD	F	-
5	Failure Isolation	BMS_VCU_INV_01.ErrorIsolation	F	-
6	Error Battery	BMS_VCU_INV_01.ActualState == enum_actstate_AMS.AMS_BatteryError	F	-
7	Inverter requests Discharge	INV_VCU_01.State == enum_state_drive.drv_Discharge	F	-
		Actions	2	1

Action Table:

#	Description	Action
1	failure worse than "Failure_regBrake" -> transition from "Failure_regBrake" to "Failure"	normal2failure = 1
2	no other failure -> no transition from "Failure_regBrake" to "Failure"	normal2failure = 0

(truth table)

Teststand_Komponenten_MA_print/VCU_Antrieb_VN1630/Chart.Fehlerzustand_Antrieb.tt_uncritical2critical

Condition Table:

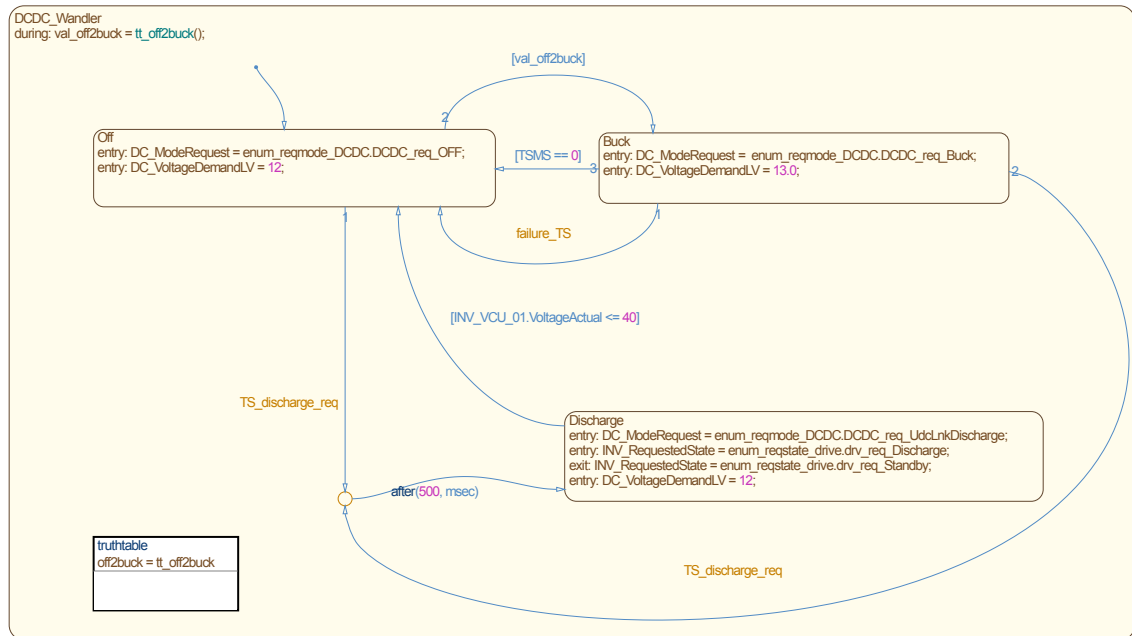
#	Description	Condition	1	2
1	Failure Brake System	failure_BSPD	F	-
2	Failure Isolation	BMS_VCU_INV_01.ErrorIsolation	F	-
3	Error Battery	BMS_VCU_INV_01.ActualState == enum_actstate_AMS.AMS_BatteryError	F	-
4	Inverter requests Discharge	INV_VCU_01.State == enum_state_drive.drv_Discharge	F	-
		Actions	2	1

Action Table:

#	Description	Action
1	critical failure, resetting by crew needed -> transition from "Failure_uncritical" to "Failure_critical"	uncritical2critical = 1
2	no critical failure, resetting by driver possible -> no transition from "Failure_uncritical" to "Failure_critical"	uncritical2critical = 0

B.3 DCDC-Wandler

B.3.1 DCDC-Wandler



B.3.2 Wahrheitstabelle

(truth table) Teststand_Komponenten_MA_print/VCU_Antrieb_VN1630/Chart.DCDC_Wandler.tt_off2buck

Condition Table:

#	Description	Condition	1	2
1	state: critical failure happened	in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_critical)	F	-
2	state: uncritical failure happened	in(Fehlerzustand_Antrieb.Failure_uncritical)	F	-
3	state: drive stopped and TS inactive	in(Fahrmodus.Stop)	F	-
4	TSMS not activated	TSMS == 0	F	-
5	GLVS voltage too high -> boundary [TKU 2.5.3 S.53]	DC_VCU_01.ActualVoltageLV > 17	F	-
6	GLVS voltage too low -> boundary [TKU 2.5.3 S.53]	DC_VCU_01.ActualVoltageLV < 6.5	F	-
7	TS voltage too high -> boundary [TKU 2.5.3 S.53]	INV_VCU_01.VoltageActual > 430	F	-
8	TS voltage too low -> boundary [TKU 2.5.3 S.53]	INV_VCU_01.VoltageActual < 220	F	-
		Actions	2	1

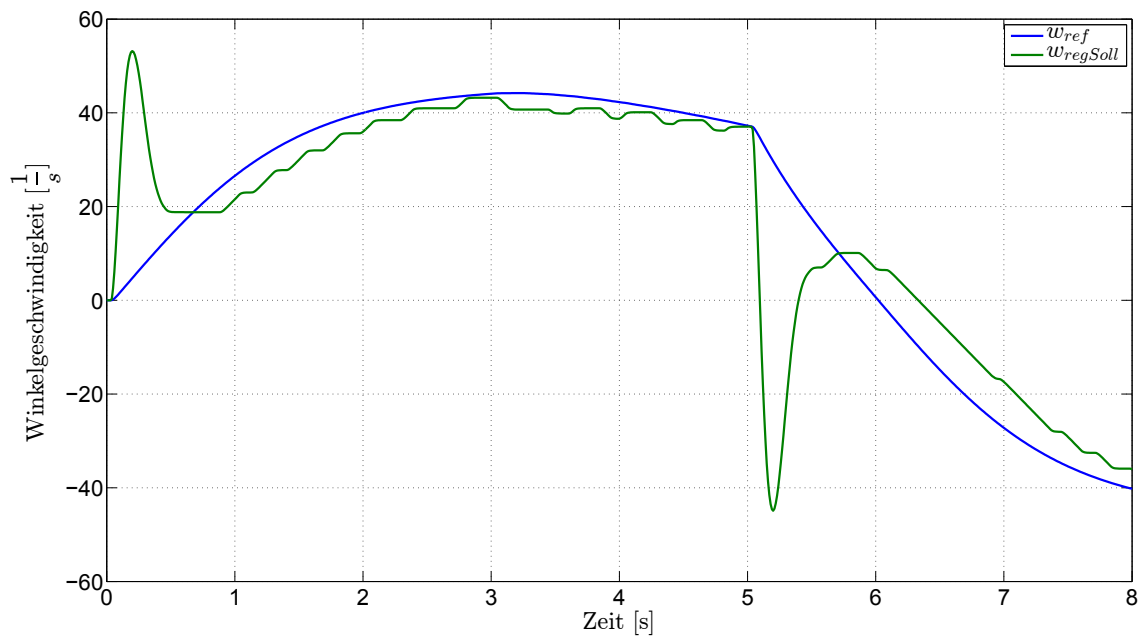
Action Table:

#	Description	Action
1	No activation off DCDC-Converter -> no transition from "Off" to "Buck"	off2buck = 0
2	Activation off DCDC-Converter -> transition from "Off" to "Buck"	off2buck = 1

Anhang C: Priorisierung CAN-Nachrichten und ihrer Tasks

Nachricht	Sender	Empfänger	Priorität	Begründung
DC_VCU_01	Antrieb	VCU	100	Messwerte DCDC-Wandler
DC_VCU_02	Antrieb	VCU	40	Rückmeldung Zustand DCDC-Wandler, nicht ausgewertet
DC_VCU_03	Antrieb	VCU	40	Meldungen derating DCDC-Wandler, nicht ausgewertet
INV_VCU_01	Antrieb	VCU	130	Zustand und Messwerte Antrieb
INV_VCU_02	Antrieb	VCU	40	Messwerte mögliches Maximalmoment, nicht ausgewertet
INV_VCU_03	Antrieb	VCU	100	Meldungen derating Antrieb
INV_VCU_04	Antrieb	VCU	100	Temperaturen Antrieb
INV_VCU_05	Antrieb	VCU	100	Messwerte langfristiges Maximalmoment, nicht ausgewertet
PSM_BMS_INV_01_GW	VCU	Antrieb, AMS	150	Meldung Unfallsensor
TBENC_VCU_01	Encoder	VCU	150	Sollmomentvorgabe durch Fahrer
VCU_DC_01	VCU	Antrieb	100	Ansteuerung DCDC-Wandler, Laden GLVS
VCU_INV_01	VCU	Antrieb	150	Batterieschutz
VCU_INV_02	VCU	Antrieb	10	Funktionen nicht in Antriebsfirmware enthalten
VCU_INV_03	VCU	Antrieb	150	Grenzwerte Sollmoment
VCU_INV_04	VCU	Antrieb	150	Sollmoment, gewünschter Betriebsmodus
VCU_INV_05	VCU	Antrieb	40	keine relevanten Parameter
VCU_INV_06	VCU	Antrieb	40	Funktionen aktuell nicht durch Antriebsfirmware ausgewertet
-	VCU	AMS	150	Kommunikationsmatrix AMS noch unbekannt
-	AMS	VCU	150	Kommunikationsmatrix AMS noch unbekannt

Anhang D: Simulation - Trägheit mit Lastfunktion - Regelung unter Nutzung des Sollmomentes der AM



Literaturverzeichnis

- [1] DECKER, K.H. ; RIEG, F. ; ENGELKEN, G. ; WEIDERMANN, F. ; HACKENSCHMIDT, R.: *Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung*. 18. Ausgabe. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. – ISBN 9783446437395 6
- [2] ETAS GMBH: *ES910.3-A Prototyping and Interface Module - Benutzerhandbuch*. 2012 41
- [3] FORMULA SAE ELECTRIC: *Failure Modes and Effect Analysis - Template*. 2014 III, 22
- [4] HARTEN, Ulrich: *Physik - Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6. Auflage. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-642-53854-4 III, 5
- [5] ISO: *ISO26262 - Road vehicles - Functional safety - Part 10: Guideline on ISO 26262*. 2012 43
- [6] KG, Bender GmbH & C.: *ISOMETER IR155-3203/IR155-3204 - Isolationsüberwachungsgerät für ungeerdete DC-Antriebssysteme (IT-Systeme) in Elektrofahrzeugen*. 2013 18
- [7] LIEBL, Johannes ; LEDERER, Matthias ; ROHDE-BRANDENBURGER, Klaus ; BIERMANN, Jan-Welm ; ROTH, Martin ; SCHÄFER, Heinz: *Energiemanagement im Kraftfahrzeug - Optimierung von CO2-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-04451-0 78
- [8] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik I - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 10. Auflage. 2014. – ISBN 978-364-25390-9-1 55, 59
- [9] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – ISBN 3-540-42011-8 II, 4, 9, 10, 79
- [10] NESTLER, Marc: Planung der Energieversorgung eines Antriebteststandes für ein Elektrofahrrad. (2014), S. 19 17, 37
- [11] OTTENS, Manfred: Einführung in die Regelungstechnik. (2008).

- http://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/user/ottens/Skripte/Einfuehrung_in_die_Regelungstechnik_01.pdf. – abgerufen am 29.12.2014 58
- [12] ROBERT BOSCH GMBH: *Technische Kundenunterlage - INVCON2.3/SMG180/120*. V3.1, April 2014. – 120 S. II, 29, 30, 32, 46, 47, 66
- [13] SAE INTERNATIONAL: *2015 Formula SAE Rules*. 2014 II, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 42, 43, 67, 68, 70, 78
- [14] SCHRÖDER, Dierk: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. 3. Auflage. 2009. – ISBN 978-3-540-89613-5 II, 11, 12, 14, 15
- [15] TRZESNIOWSKI, Michael: *Rennwagentechnik - Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*. 4. Auflage. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-365-80491-9-5 II, 10, 11, 76
- [16] UNBEHAUEN, Heinz: *Regelungstechnik I*. 15. Auflage. 2008. – ISBN 978-3-8348-9491-5 55
- [17] W. MENTER, Patrick: *Tools and Ecosystem for Automotive Development*. http://www.freescale.com/files/training_pdf/VFTF09_AA105.pdf. Version: Juli 2009 40
- [18] ZACHER, Serge ; REUTER, Manfred: *Regelungstechnik für Ingenieure - Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. 14. Auflage. 2014. – ISBN 978-3-8348-2216-1 12, 14

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 31.01.2015